

VERGLEICH VERSCHIEDENER INDIREKTER
MESSMETHODEN ZUR SPANNUNGSBESTIMMUNG
IN DER RÖNTGENDIAGNOSTIK

von

Michael Zumpe

aus

Nürnberg

Diss Erlangen
1984

Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Institut für Radiologie
der Universität Erlangen-Nürnberg

Direktor: Prof. Dr. med. Dr. phil. nat. H. Pauly

VERGLEICH VERSCHIEDENER INDIREKTER MESSMETHODEN ZUR SPANNUNGSBESTIMMUNG IN DER RÖNTGENDIAGNOSTIK

INAUGURAL – DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich - Alexander - Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt

von

Michael Zumppe

aus

Nürnberg

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

Dekan: Prof. Dr. F. Wolf
Referent: Priv.-Doz. Dr. Th. Schmidt
Korreferent: Prof. Dr. Dr. H. Pauly
Tag der mündlichen Prüfung: 21.05.1984

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Methodik	4
2.1 Meßverfahren	4
2.2 Ardran-Crooks-Kassette	5
2.2.1 Beschreibung	5
2.2.2 Leistungsfähigkeit	7
2.2.2.1 Meßbereich	7
2.2.2.2 Auswertung	8
2.2.2.3 Abstufung	10
2.2.2.4 Wahl des Referenzpunktes	11
2.2.2.5 Film und Belichtung	13
2.2.2.6 Kalibrierung	15
2.2.2.7 Andere beeinflussende Faktoren	17
2.2.3 Erzielbare Genauigkeit	18
2.3 Wisconsin-Kassette	19
2.3.1 Beschreibung	19
2.3.2 Leistungsfähigkeit	22
2.3.2.1 Meßbereich und Abstufung	22
2.3.2.2 Auswertung und Kalibrierung	23
2.3.2.3 Film und Belichtung	24
2.3.2.4 Handhabung	26
2.3.3 Kritik	26
2.3.4 Erzielbare Genauigkeit	27
2.4 Doppelkammermethode	28
2.4.1 Beschreibung	28
2.4.2 Leistungsfähigkeit	29
2.4.2.1 Meßbereich	29
2.4.2.2 Räumliche Integration	29

	Seite
2.4.2.3 Stufenloses Messen	30
2.4.2.4 Dosisunabhängigkeit	30
2.4.3 Kritik	30
2.4.3.1 Eigenfilterbestimmung	30
2.4.3.2 Anschlußbereich der Meßkurven	32
2.4.3.3 Fehler bei der Bestimmung der Quotienten Q	34
2.4.3.4 Ungleichmäßige Genauigkeit	35
2.4.3.5 Kalibrierung	35
2.4.3.6 Dentalröntgengeräte	36
2.4.3.7 Handhabung	36
2.4.4 Erzielbare Genauigkeit	37
2.5 Das Siemens-kV-Meßgerät	38
2.5.1 Beschreibung	
2.5.1.1 Technische Ausführung	38
2.5.2 Leistungsfähigkeit	40
2.5.2.1 Meßbereich, Abhängigkeit von der Röhrenvorfilterung	40
2.5.2.2 Handhabung, Reproduzierbarkeit	40
2.5.2.3 Generatorabhängigkeit, Kalibrierung	41
2.5.2.4 Dosisabhängigkeit	42
2.5.3 Kritik	42
2.5.3.1 Durchleuchtungsbetrieb, Dentalröntgengeräte	42
2.5.3.2 Meßbereich	42
2.5.3.3 Bleibende	43
2.5.3.4 Absolute Meßgenauigkeit, Eingabe der Pulsform	43
2.5.4 Erzielbare Meßgenauigkeit	44

	Seite
3. Meßergebnisse	45
4. Diskussion der Meßergebnisse an verschiedenen Röntgengeräten	55
4.1 Pandoros-Gleichspannungsgenerator (Klinikum Nürnberg - Radiologisches Zentrum)	55
4.2 Tridoros-Optimatic-Generator mit drei Arbeitsplätzen in der Röntgenabteilung der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen	58
4.3 Polyphos-Generator im Versuchslabor der Firma Siemens	63
4.4 Gigantos-Generator im Arbeitsraum RÖ 16 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg	65
4.5 Gigantos-Generator im Arbeitsraum RÖ 3 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg	70
4.6 Messungen an Tridoros Generatoren älterer Bauart	71
4.7 Messungen an Dentalröntgengeräten in der Zahn-, Mund- und Kieferklinik der Universität Erlangen	73
4.8 Messungen am Stabilipan-Generator im Institut für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg	74
5. Wertung	76
6. Zusammenfassung	82
Literatur	

1. Einleitung

Von verschiedenen internationalen, nationalen und regionalen Kommissionen und Gesellschaften wird heute die Einführung von Qualitätskontrollen in der Röntgendiagnostik befürwortet. An die Einführung solcher Programme knüpft sich die Hoffnung

- die Strahlenexposition bei röntgendiagnostischen Maßnahmen zu reduzieren,
- die Bildqualität für die Befundung zu erhöhen und
- möglicherweise die Kosten für röntgendiagnostische Maßnahmen insgesamt zu senken.

Der durch Fehlbelichtungen verursachte Betrag wird z.B. für die USA auf $470 \cdot 10^6$ Dollar geschätzt (1). Neben diesen offensichtlichen Kostenersparnissen würde eine Qualitätskontrolle die Strahlenexposition für Patient und Personal reduzieren. Der Gewinn hierdurch ist jedoch ebenso wie der Gewinn durch die bessere Bildqualität schwer quantifizierbar.

Die Notwendigkeit für Qualitätskontrollen wurde durch verschiedene Pilotstudien weltweit bewiesen (z.B. 2, 3, 4, 5). So hat z.B. Holloway (6) vor mehr als 10 Jahren schon Unterschiede um mehr als den Faktor 10 - bei der gleichen klinischen Fragestellung - für die Strahlenexposition gefunden. Diese großen Differenzen existieren nach wie vor, wie die Ergebnisse des sog. NEXT-Programmes ergeben haben (7). Neben diesen großen Unterschieden in der Strahlenexposition wurden jedoch auch bei Pilotstudien neben anderen, die Exposition beeinflussenden Parametern, erhebliche Abweichungen zwischen eingestellter Spannung und Sollspannung gefunden (8, 9). Es ist offen-

sichtlich, daß die Qualitätssicherung sich auf verschiedene Parameter, die die Bildqualität und die Strahlenexposition betreffen, erstrecken muß.

Verschiedene Autoren (z.B. 10, 14) haben darauf hingewiesen, daß die Qualität nicht durch eine einzelne Messung eines bestimmten Parameters erhoben werden kann. Aus pragmatischen Gründen wird man sich heute darauf konzentrieren, eine Vielfalt einzelner Parameter zu messen, deren Einfluß auf Bildqualität und Strahlenexposition offensichtlich ist. Hierzu gehören u. a.:

die Röhrenspannung,
die Fokusgröße,
die Dosisleistung,
die Belichtungszeit,
die Justierung des Rasters,
die Justierung der Feldblende
und vieles mehr.

In der vorliegenden Arbeit sollte einer dieser Parameter, nämlich die Röhrenspannung, näher untersucht werden. Der genauen Einstellung der Röhrenspannung kommt entscheidende Bedeutung für die Strahlenexposition des Patienten zu. Eine Änderung um 10 kV kann bei etwa gleicher Bildqualität die Eintrittsdosis um den Faktor 2 erhöhen (11). Hierbei geht es nicht so sehr darum, die Spannung zu ändern, sondern vielmehr muß überprüft werden, ob die gewünschte und angezeigte Spannung tatsächlich mit der an der Röhre anliegenden Spannung übereinstimmt.

Wie Vorversuche von verschiedenen Autoren gezeigt haben (12, 13) sind hier tatsächlich erhebliche Abweichungen zu erwarten.

Eine direkte Messung der Hochspannung wird nur in den seltensten Fällen notwendig und praktikabel sein. In der Literatur werden jedoch verschiedene sog. indirekte Methoden beschrieben, die ebenso wie die in den letzten Jahren von der Industrie angebotenen Geräte für die Spannungsmessung geeignet erscheinen. Sämtlichen Methoden ist jedoch gemeinsam, daß sie aus Schwächungsunterschieden durch Filter einen Rückschluß auf die Spitzenspannung oder auf die effektive Spannung zulassen.

Es ist Absicht und Ziel der vorliegenden Arbeit, die im Moment zugänglichen Methoden zur Spannungsbestimmung zu untersuchen und zwar vor allem im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit aber auch auf ihre Praktikabilität in der Routine. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen eine Entscheidungshilfe für die Auswahl des zweckmäßigsten Gerätes zur Spannungsbestimmung geben.

Gleichzeitig sollten jedoch auch die verschiedenen Methoden an den verschiedenen Generatortypen, wie sie z.B. in der Universitätsklinik Erlangen und dem Klinikum Nürnberg installiert sind, in der Praxis erprobt werden.

2. Methodik

2.1 Meßverfahren

Im folgenden werden die in die Untersuchung einbezogenen Meßverfahren zur Hochspannungsbestimmung an Röntgendiagnostikgeräten vorgestellt. Alle vier Verfahren arbeiten nach dem Prinzip der indirekten Messung, d.h. es wird keine direkte Verbindung mit der elektrischen Schaltung des Röntgengerätes hergestellt, wie dies z.B. bei den üblichen Messungen mittels Spannungsteiler und Oszillograph zur Installation und Wartung der Röntgengeräte der Fall ist (27).

Die hier untersuchten Meßmethoden haben somit den Vorteil, einfacher und schneller zu arbeiten und öfter bei Routineuntersuchungen benutzt werden zu können. Es sind hierbei keine speziellen technischen Kenntnisse über den Aufbau der Röntgeneratoren nötig, während für direkte Messungen jeweils speziell ausgebildete Techniker der Herstellerfirma des jeweiligen Gerätes herangezogen werden müssen.

Da alle vier Meßmethoden aber indirekt arbeiten, müssen äußere Einflüsse auf das Meßergebnis (Spannung) eliminiert werden.

Hier sind z.B. zu nennen der Abstand des Meßgeräts von der Röhre, die Filterung der Röntgenröhre, die Eigenschaften der verwendeten Filme und vieles mehr. Die Lösungen für diese Probleme sind in den Abschnitten 2.2 bis 2.5 beschrieben.

Allen Methoden ist gemeinsam, daß sie integrierend arbeiten, d.h. sie messen über einen gewissen Zeitraum und bilden ein gemitteltes Ergebnis.

2.2 Ardran-Crooks-Kassette

2.2.1 Beschreibung

Die hier untersuchte Testkassette (hergestellt von den Physikalisch-Technischen Werkstätten Dr. Pychlau GmbH in Freiburg/Breisgau) arbeitet nach der Methode von Ardran und Crooks (15, 16).

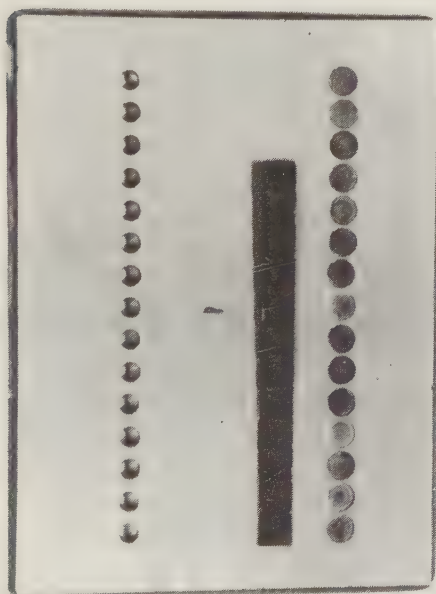


Abb. 1: Ansicht der Frontseite der Ardran-Crooks-Kassette. Man erkennt links eine Reihe runder Bohrungen für die Referenzschwärzungen; rechts die beiden Reihen der Kupferfiltertreppe

Diese Spezialkassette unterscheidet sich äußerlich nicht wesentlich von einer normalen Röntgenkassette des Formats $13 \times 18 \text{ cm}^2$ (es wird auch das gleiche Filmmaterial verwendet). Die Frontplatte der Kassette ist bis auf zwei Bereiche mit Blei abgedeckt. Im linken Teil (s. Abb. 1) kann die Strahlung durch kreisrunde Bohrungen direkt hindurchtreten. Sie trifft auf eine geringverstärkende Fluoreszenzfolie, die die sog. Referenzschwärzung erzeugt. Im rechten Teil (s. Abb. 1) wird die Strahlung durch eine Kupfertreppe (Cu-Filter ansteigender Dicke) geschwächt. Die in diesem Teil der Kassette verwendete Folie ist hochverstärkend. Die Kupferfilter höherer Dicke, die von weicher Strahlung nicht durchdrungen werden können, werden bei zunehmender Spannung durchstrahlt. Nach Belichtung und Entwicklung erhält man ein Muster, wie z.B. in Abb. 2 wiedergegeben.

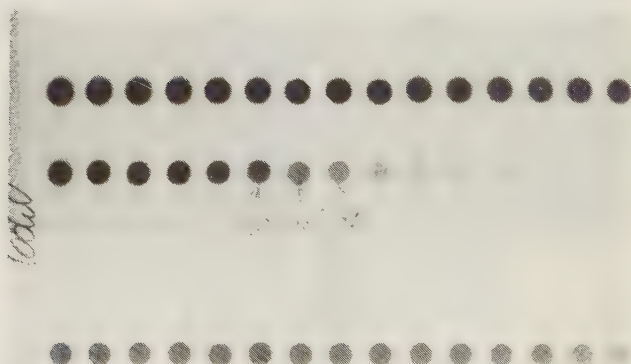


Abb. 2: Ein mit der Ardran-Crooks-Kassette belichteter Film zeigt eine Reihe nahezu gleichmäßig geschwärzter Referenzpunkte, sowie eine je nach Spannung unterschiedlich geschwärzte Meßreihe (beide obere Reihen) unter der Kupfertreppe

Auf der einen Seite des Films sieht man eine Reihe gleichmäßig geschwärzter Punkte, die die Referenzreihe bilden, auf der anderen Seite eine oder zwei Zeilen von Punkten mit abnehmender Schwärzung. Aus dieser Reihe wird der Punkt, dessen Schwärzung der Referenzschwärzung entspricht, ausgesucht (meist mit Hilfe eines Densitometers) und die zugehörige Dicke des Kupferfilters abgelesen. Aus einer Kalibrierkurve, die individuell für jede einzelne Kassette mitgeliefert wird, kann aufgrund dieser Filterdicke die zugehörige Spannung ermittelt werden.

Weil Referenzschwärzung und Schwärzung nach Durchgang durch die Kupferfilter im gleichen Film erzeugt werden, kommt dem Betrag der Dosis nur untergeordnete Bedeutung zu; die Schwärzung ist abhängig von der Röhren-Film-Distanz, dem Typ des Films und den Entwicklungsbedingungen.

Verfälschung durch die Vorfilterung der Röhre werden durch mitgelieferte Cu-Filter (0,35 mm bzw. 1,5 mm Cu) vermieden, die im Strahlengang befestigt werden. Sie härten die Strahlung wesentlich stärker auf als die Filterungen der Röhren, die nur ca. 2 - 5 mm Al betragen. Nähere Einzelheiten können der Bedienungsanleitung entnommen werden (17).

2.2.2 Leistungsfähigkeit

2.2.2.1 Meßbereich

Mit der Pychlau-Kassette (Nr. 2674-045) nach Ardran-Crooks können Spannungen im Bereich von 40 - 70 kV (mit 0,35 mm Cu-Vorfilterung) bzw. von 50 - 155 kV (1,5 mm Cu) bestimmt werden. Da den Kupferfiltern einzelne Spannungsstufen entsprechen, müssen Zwischenwerte interpoliert werden. Die Hersteller geben eine erreichbare Genauigkeit von 1 - 2 kV an.

2.2.2.2 Auswertung

Nach Entwickeln des Röntgenfilms werden die Schwärzungspunkte densitometrisch ausgewertet und aus einer Kalibrierkurve die Spannung ermittelt. Diese Kalibrierkurve (Abb. 3 und 4) wird von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung für jede Kassette individuell erstellt.

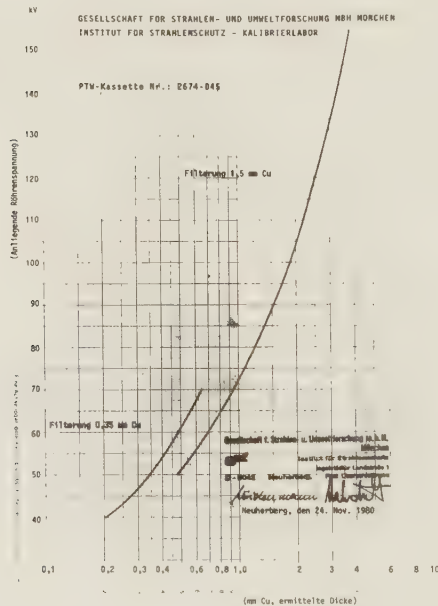


Abb. 3: Kalibrierkurven der Ardran-Crooks-Kassette. Die Kalibrierung bezieht sich auf eine Filterung von 0,35 mm Cu bzw. auf 1,5 mm Cu.

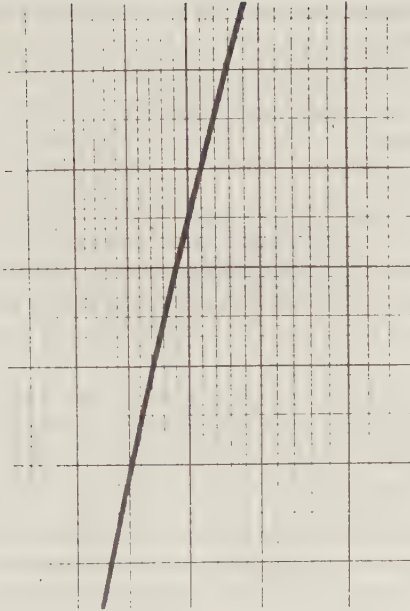


Abb. 4: Ausschnittvergrößerung der Kalibrierkurve der Ardran-Crooks-Kassette im Bereich von 3 mm Cu. Man erkennt die sehr große Strichdicke der Kalibrierkurve im Verhältnis zu der ermittelnden Spannung (die Unterteilung der Abszisse beträgt 1 kV pro Einheit).

Die Strichstärke der Kalibrierkurve ist im Verhältnis zur kV-Einteilung der Ordinate sehr groß. Dies bedingt Schwierigkeiten beim Ablesen der Spannung, besonders in dem Teil der Kalibrierkurve, der sehr steil verläuft. Bei

einer Kupferfilterdicke von 3 mm läßt die Strichdicke der Kalibrierkurve bereits eine Ungenauigkeit von ca. 2 kV (Abb. 4) zu. Eine Aufteilung des Meßbereichs und Dehnung des Abszissenmaßstabs in mehrere Graphiken könnte eine genauere Ablesung zulassen.

2.2.2.3 Abstufung

Für den Spannungsbereich von 56 - 145 kV stehen 13 Kupferfilter zur Verfügung, denen jeweils eine definierte Spannung entspricht; Zwischenwerte müssen interpoliert werden. Wertet man die zugehörige Kalibrierkurve aus, so erhält man die in Tabelle 1 wiedergegebenen Werte.

Tab. 1: Zusammenhang zwischen der Dicke der Kupferfilterstufen der Ardran-Crooks-Kassette und der aus der Kalibrierkurve ermittelten Spannung. Zusätzlich wurden die "Abstände" zwischen den einzelnen Stufen in kV und % errechnet.

Kupferfilter- stärke in mm	kV	Abstand zur nächsten Stufe
0,6	56,0	+ 4,0 kV (7,1 %)
0,7	60,0	+ 4,5 kV (7,5 %)
0,8	61,5	+ 4,0 kV (6,2 %)
0,9	68,5	+ 4,0 kV (5,8 %)
1,0	72,5	+ 7,0 kV (9,6 %)
1,2	79,5	+ 6,5 kV (8,2 %)
1,4	86,0	+ 6,0 kV (7,0 %)
1,6	92,0	+ 6,0 kV (6,5 %)
1,8	98,0	+ 6,0 kV (6,1 %)
2,0	104,0	+15,0 kV (14,4 %)
2,5	119,0	+13,5 kV (11,3 %)
3,0	132,5	+12,5 kV (9,5 %)
3,5	145,0	

Vergleicht man die Abstände der Tabelle, so zeigt sich eine sehr ungleichmäßige Verteilung. Die feinste Abstufung beträgt 4 kV (relativ 5,8 %). In diesem Bereich kann durch Interpolation eine Genauigkeit von 1 - 2 kV erzielt werden, wie sie der Hersteller angibt (17). Im höheren Spannungsbereich ist diese Stufung jedoch gröber, zwischen 104 und 119 kV klafft eine Lücke von 15 kV. Da in diesem Bereich die Auswertung der Kalibrierkurve ebenfalls erschwert ist (vgl. 2.2.3.1), kann die angegebene Genauigkeit von 1 - 2 kV hier nicht erreicht werden. Ein kleiner Fehler von ca. 0,25 kV tritt hier zusätzlich auf, weil die Kalibrierkurve nicht vollkommen linear verläuft und somit das Interpolieren erschwert.

2.2.2.4 Wahl des Referenzpunktes

Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Spannung bereitet außerdem der Umstand, daß die Reihe der Referenzpunkte, die theoretisch alle die gleiche Schwärzung zeigen sollten, in Wirklichkeit eine Streuung aufweisen. Erklärt werden kann diese Beobachtung durch einen Dosisabfall auf der Anodenseite, der durch eine Abschirmwirkung der Anode zustande kommt (Heel-Effekt), (18, 21). Dies kann eine Veränderung in der Schwärzung bis zu 23 % bedeuten (vgl. Abb. 5).

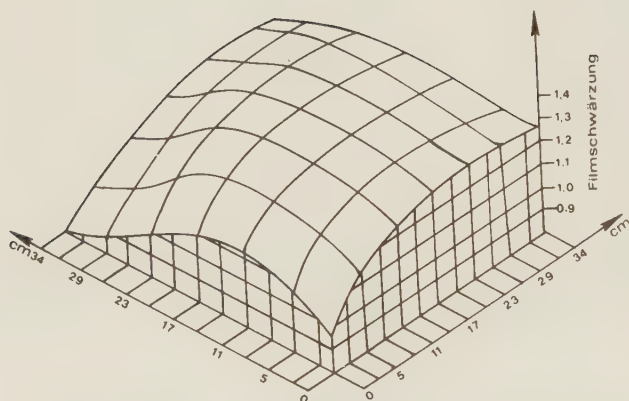


Abb. 5: Darstellung der Schwärzungsverteilung im Bestrahlungsfeld. In der Ebene sind die Koordinaten der Meßpunkte auf dem Film in cm, auf der nach oben gerichteten Achse ist der Schwärzungsgrad als Maß für die Dosis in relativen Densitometereinheiten dargestellt (nach Wardenburg (18)).

Durch eine Ausrichtung der Kassette senkrecht zur Kathoden-Anodenrichtung kann der Einfluß dieser Abschirmung größtenteils unterdrückt werden. Trotzdem bleiben je nach Röhrentyp immer noch Schwankungen, da auch in dieser Richtung Dosisveränderungen festgestellt wurden (18). Schwankungen in der Schwärzungsdichte der Meßpunkte sind möglicherweise auch auf Herstellungstoleranzen der verwendeten Filterfolien zurückzuführen.

Zur Bestimmung des Referenzwertes kann nun ein Mittelwert gebildet werden; die Genauigkeit der Messung wird damit aber nicht erhöht, denn für die Punkte, die unter

der Kupfertreppe liegen, besteht die Möglichkeit der Mittelwertbildung nicht. Je nach ihrer räumlichen Lage auf dem Röntgenfilm unterliegen sie aber denselben Schwankungen.

Für die hier gemachten Messungen wurden extreme Schwärzungswerte vermieden und Referenzpunkte für die Messung herangezogen, die in der Nähe der jeweiligen Punkte unter der Kupfertreppe liegen, so daß sich beide Punkte möglichst im selben Bereich des Feldes befinden.

2.2.2.5 Film und Belichtung

Um eine optimale Auswertung der Filme zu ermöglichen, sollte die Reihe der Referenzpunkte eine Schwärzungsdichte im Bereich von $S = 1$ besitzen, weil hier, im linearen Teil der Film-Schwärzungskurve, beste "Tonwerttrennung" erzielt wird. Zu diesem Zweck liefert der Hersteller eine Testkurve mit, aus der bei der jeweiligen Spannung das notwendige Strom-Zeit-Produkt ermittelt werden kann. In der Praxis kommt es dennoch zu erheblichen Belichtungsfehlern:

- a) Die angegebenen mAs-Werte liegen nach den hier gesammelten Erfahrungen mit den gängigen Filmfabrikaten generell zu hoch, insbesondere im 60 kV-Bereich. Der Hersteller gibt 280 - 500 mAs an, 70 - 150 mAs (je nach Generator) sind jedoch für eine optimale Schwärzung völlig ausreichend. Dies kann durch veränderte Filmmaterialien seit Entwicklung der Kassette erklärt werden, eine Überarbeitung dieser Kalibrierkurve wäre vielleicht angezeigt.
- b) Bei Meßbeginn an den jeweiligen Geräten ist noch nicht bekannt, wie genau die eingestellte Spannung tatsächlich erreicht wird. 3 % Spannungsdifferenz führen aber z.B. bereits zu einer Belichtungsänderung von 20 %.

- c) Ebenfalls nicht bekannt ist, inwieweit das eingestellte Produkt aus Röhrenstrom und Belichtungszeit vom Generator eingehalten wird.

Aus den oben erwähnten Gründen kommt es mit der Ardran-Crooks-Kassette häufig zu "Fehlbelichtungen", die schwer auszuwerten sind. Dies bedingt Wiederholungsmessungen, die einen großen Zeitverlust bedeuten. Jede einzelne Spannungsmessung hat einen ungewissen Ausgang, da es z.B. möglich ist, daß eine Röntgenröhre bei 80 kV die Spannung noch sehr genau einhält, während bei 100 kV eine Abweichung vorliegt. Auch zwei Röhren an einem Gerät können bei gleicher vorgegebener Spannung sehr unterschiedliche Strahlenhärten besitzen. So brachte die Messung an einem Tridoros-Optimatic-Generator bei einer eingestellten Spannung von 70 kV an der ersten Röhre eine Schwärzung von $S = 0,6$ (64 kV), bei der zweiten Röhre aber von $S = 1,3$ (71 kV).

Die Einhaltung einer Referenzschwärzung von $S = 1$ mit einer Toleranz von $\pm 0,2$, wie sie die Hersteller empfehlen (17), wird in den meisten Fällen sehr schwierig zu erzielen sein. Zu oben genannten Problemen kommt hinzu, daß nur sehr selten am Ort der Messung ein Densitometer zur Verfügung steht. Eine visuelle Abschätzung der Schwärzung innerhalb dieser engen Toleranzen ist aber unmöglich. Von anderen Autoren (22) wird auch eine Schwärzung im Bereich von $S = 0,5 - 2,5$ als brauchbar erachtet. Es hat sich jedoch gezeigt, daß Filme mit $S = 2,0$ bereits sehr schwierig auszuwerten sind. Die Dichteunterschiede unter der Kupfertreppe sind im fraglichen Bereich wegen des abgeflachten Teils der Film-Schwärzungskurve sehr gering. Durch diese kleinen Differenzen leidet die Genauigkeit der Messung, insbesondere dann, wenn interpoliert werden muß.

2.2.2.6 Kalibrierung

Die Hersteller machen keine Angaben darüber, an welchem Röntgengerät die Kalibrierkurve ermittelt wurde. Da der Film über einen gewissen Zeitraum integriert (Aufnahmezeit), werden nicht die tatsächlichen Spitzenspannungen gemessen, sondern eine Effektivspannung, die stark von der Art des verwendeten Generatortyps abhängt. Bei einem Halbwellengerät z.B. ist die an der Röhre anliegende Spitzenspannung erheblich höher, als die gemessene Effektivspannung.

Tabelle 2: Vergleich der Spitzenspannung der unterschiedlichen Generatortypen bei gleicher gemessener Effektivspannung von 93,5 kV

Zweipulsgenerator	100,0 kV
Sechspulsgenerator	95,5 kV
Zwölfpulsgenerator	94,0 kV
Gleichspannungsgenerator	93,5 kV

Andererseits kommt der Spitzenspannung auch keine so wichtige Aussagekraft zu, der in der Diagnostik verwendete Film integriert ja genau wie der verwendete Testfilm; während eines Großteils der Aufnahmezeit entspricht die Härte der Strahlung nicht der Spitzenspannung, sondern kleineren Spannungswerten. Besonders stark kommt dies bei Halbwellengeräten zum Tragen. Eine Aufnahme mit einem Zweipulsgenerator mit einer Spitzenspannung von 100 kV wird ein anderes Bildergebnis erzeugen als eine Aufnahme mit einem Gleichspannungsgerät von 100 kV.

Beim Zweipulsgerät trägt die Spitzenspannung ja nur während einer sehr kurzen Zeit zur Aufnahme bei, während des Großteils der Expositionszeit fällt "weichere Strahlung" auf die Kassette.

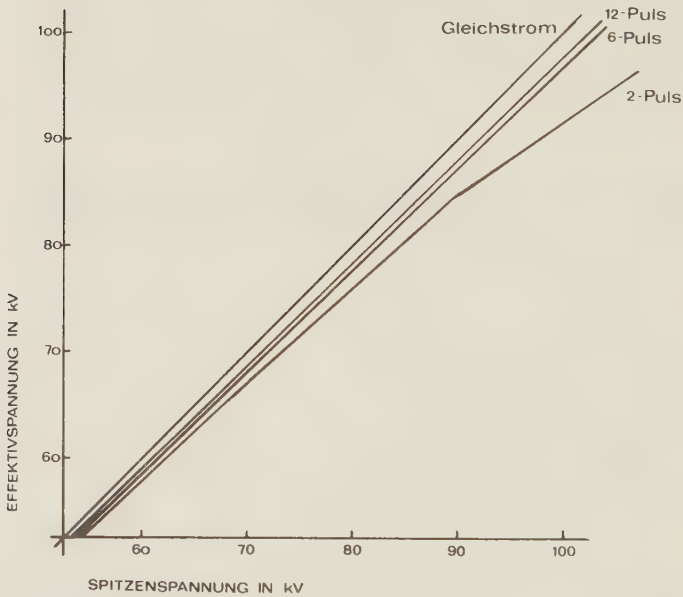


Abb. 6: Unterschied zwischen Spitzen- und Effektivspannung bei den unterschiedlichen Generatortypen (Umzeichnung nach Aichinger (24))

2.2.2.7 Andere beeinflussende Faktoren

- a) Die charakteristische Strahlung und die extrafokale Streustrahlung (EFR) können das Bildergebnis in geringem Maße beeinflussen (21). Beide werden aber erst im Bereich ab ca. 100 kV wirksam: die charakteristische Strahlung führt maximal zu einer Zunahme des Meßergebnisses von + 0,3 %, die EFR führt zu einer Minderung der Strahlenhärte von maximal 1 kV; beide Effekte können sich also gegenseitig teilweise kompensieren.
- b) Die separaten Kupferfilter, die an der Röntgenröhre befestigt werden müssen, können die Messung nicht vollkommen unabhängig von der Röhren-Vorfilterung machen (22), eine Zunahme der Röhrenfilterung von z.B. 4 mm Al führt im 100 kV-Bereich zu einem Fehler von + 2,5 %.
- c) Bei den Kassettenmessungen kommt der Umwandlung der Röntgenstrahlung in sichtbares Licht mit Hilfe der Verstärkerfolien große Bedeutung zu. Wie oben erwähnt, zeigte eine Untersuchung der Schwärzungspunkte ein grobkörniges, unregelmäßiges Bild. Das Verstärkungsverhältnis der Folien zeigte bei anderen Untersuchungen (21, 22) Schwankungen. Ungeklärt ist ferner der Einfluß von Lagerungsdauer und -bedingungen auf die Fluoreszenzeigenschaften der Folien. Es wird deshalb ein regelmäßiges Nachkalibrieren der Kassetten in bestimmten Intervallen (z.B. 2-3 Monate) empfohlen (21). Als lästig wurde es empfunden, daß die mitgelieferten Vorfilter nicht in die handelsüblichen Kollimatoren paßten und dadurch Improvisationen mit Klebeband u.ä. erzwingen.

2.2.3 Erzielbare Genauigkeit

Es ist schwierig, die erzielbare Genauigkeit anzugeben, weil die Fehlermöglichkeiten sehr starken Schwankungen ausgesetzt sind. Deshalb sollen hier nochmals zusammenfassend die Fehlerquellen mit dem Bereich des jeweiligen Meßfehlers angegeben werden.

Tab. 3: Zusammenfassung der Fehlerquellen bei der Messung mit der Ardran-Crooks-Kassette, Abschätzung ihrer Größenordnung

Fehlerquelle	Größe des Fehlers bei 100 kV
Ablesefehler	$\pm 0,5$ kV
Fehler durch Interpolieren, je nach Abstufung	± 1 kV
Fehler beim Interpolieren bedingt durch nichtlinearen Verlauf der Kalibrierkurve	$\pm 0,25$ kV
Generatortyp	0 - 4,5 kV
Röhrenfilterung	$\pm 2,5$ kV

Es entsteht ein mittlerer quadratischer Fehler von 5,3 kV.

Generell ist im höheren Spannungsbereich mit einer Zunahme des Meßfehlers zu rechnen, weil einige Effekte, wie der Einfluß der Röhrenvorfilterung, die Ablesegenauigkeit, die schlechtere Abstufung, die extrafokale Streustrahlung, erst in diesem Bereich einen stärkeren Einfluß auf das Meßergebnis haben. Auch der Generatortypus verändert das Meßergebnis erst in diesem Bereich stärker (20).

2.3 Wisconsin-Kassette

2.3.1 Beschreibung

Die Wisconsin-Kassette (Abb. 7) kann als eine Weiterentwicklung der Ardran-Crooks-Kassette betrachtet werden. Sie arbeitet nach demselben Grundprinzip (15, 16) und wurde von Jacobson entwickelt (25).

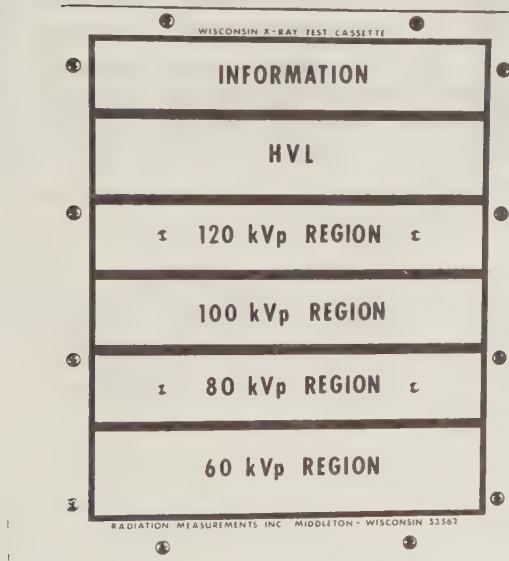


Abb. 7: Aufsicht auf die Wisconsin-Kassette. Die Frontseite zeigt die Unterteilung der Kassette in fünf Meßbereiche für Spannungen um 60, 80, 100 und 120 kV, sowie für die Bestimmung der Halbwertschichtdicke. Die Kupferfiltertreppen liegen unter der Abdeckplatte und sind von außen nicht sichtbar.

Ihr technischer Aufbau ist gegenüber der Ardran-Crooks-Kassette etwas modifiziert. Belichtet wird ein $20 \times 25 \text{ cm}^2$ großer Film. Die Fläche ist in fünf Abschnitte unterteilt; vier Bereiche für die Bestimmung der Spannungen um 60, 80, 100 und 120 kV und ein Bereich für die Bestimmung der Halbwertschichtdicke. Jeder Abschnitt besitzt 10 Referenzpunkte und 10 Meßpunkte. Wie bei der Ardran-Crooks-Kassette trifft die Strahlung entweder auf Bohrungen in der Bleiabschirmung (Referenzschwärzung) oder auf die Kupfertreppe. Von außen ist dies nicht zu erkennen, da bei dieser Methode die Kupfervorfilterung in der Kassette angebracht ist. Der wesentliche Unterschied zur Ardran-Crooks-Kassette besteht darin, daß die Wisconsin-Kassette keine zwei verschieden verstärkende Folien benutzt, sondern nur eine. Stattdessen sind unter den Bohrungen, die die Referenzschwärzung erzeugen, optische Absorber angebracht. Die Empfindlichkeit dieser Kassette ist deshalb nur ca. 30 - 50% der Ardran-Crooks-Kassette. Durch eigens angefertigte Bleiblenen lassen sich Teilbelichtungen der Einzelabschnitte der Kassette durchführen.

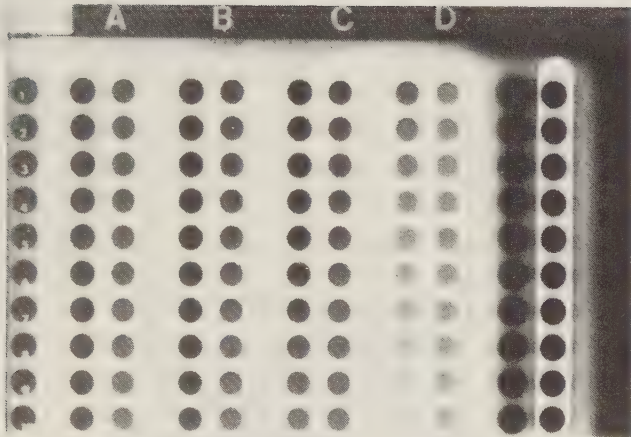


Abb. 8: Ein mit der Wisconsin-Kassette belichteter Film: Referenzreihe und Meßreihe liegen jeweils nebeneinander. Auf einem Film können vier Spannungen gleichzeitig gemessen werden, wenn man die jeweils nicht benötigten Bereich mit Bleiplatten abdeckt.

2.3.2 Leistungsfähigkeit

Da die Wisconsin-Kassette nach demselben technischen Grundprinzip arbeitet wie die Ardran-Crooks-Kassette, trifft vieles unter Abschnitt 2.2.3 Gesagte ebenfalls auf sie zu. Spezielle Unterschiede werden im Folgenden behandelt.

2.3.2.1 Meßbereich und Abstufung

Mit der Wisconsin-Kassette kann man in vier Bereichen Spannungen messen:

1. von 47 - 70 kV (Bereich A)
2. von 69 - 88 kV (Bereich B)
3. von 85 - 103 kV (Bereich C)
4. von 100 - 129 kV (Bereich D)

Dieser Meßbereich ist zwar kleiner als bei der Ardran-Crooks-Kassette (Ardran-Crooks-Kassette 40 - 155 kV), aber die Abstufung der Kupfertreppe ist erheblich feiner; die Stufen betragen im einzelnen:

- im Bereich A: 3,6 kV
- im Bereich B: 2,35 kV
- im Bereich C: 3,25 kV
- im Bereich D: 4,40 kV

Die relative Differenz zur nächsten Stufe beträgt z.B. bei 60 kV = 6%, bei 80 kV = 2,9%, bei 100 kV = 3,2%. Deutlich ist insbesondere die feinere Abstufung bei den höheren Spannungen, die Ardran-Crooks-Kassette hat bei 100 kV eine Differenz zur nächsten Stufe von 14,4%, nur im Spannungsbereich von 64 - 72 kV erreicht sie eine annähernd gleich feine Abstufung.

2.3.2.2 Auswertung und Kalibrierung

Die Kalibrierkurven der Wisconsin-Kassette verlaufen durch entsprechende Wahl der Kupferfilter linear, während die der Ardran-Crooks-Kassette eine leichte Krümmung aufweist (vgl. Abb. 3, 4).

Dies bedeutet zusammen mit der feineren Abstufung der Filter, daß Zwischenwerte leichter und sicherer durch Interpolation ermittelt werden können.

$$\begin{aligned} 3\phi &= \text{---} \\ 1\phi &= \text{---} \end{aligned}$$

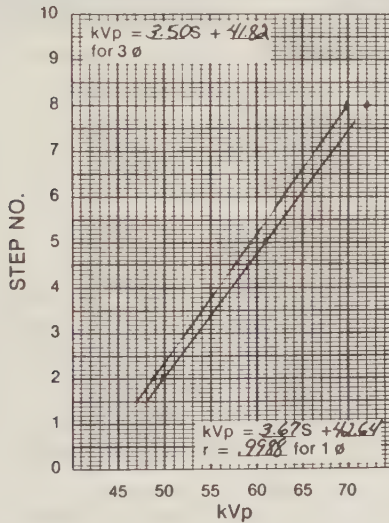


Abb. 9: Eine von vier Kalibrierkurven für die Wisconsin-Kassette. Man erkennt den linearen Verlauf, der zusammen mit einer Spreizung der Abszisse eine genauere Bestimmung des Meßwertes erlaubt. Die Strichdicke ist in Relation zum Abszissenmaßstab wesentlich geringer als bei der Ardran-Crooks-Kassette (vgl. Abb. 4).

Eine Betrachtung der Kalibrierkurve zeigt außerdem, daß die Strichstärke der Kurve im Vergleich zur kV-Einteilung wesentlich dünner ist als bei der Ardran-Crooks-Kassette, der Ablesefehler beträgt hier maximal $\pm 0,25$ kV. Dies wurde zum Teil auch durch Aufteilung des Meßbereichs in vier Abschnitte erreicht.

Bei der Betrachtung der Kalibrierkurven fällt auf, daß es in jedem Meßbereich zwei gibt: für Anlagen mit normaler Stromversorgung und für Drehstromanlagen. Dadurch wird bereits eine gewisse Differenzierung der Generatortypen erreicht. Mit normaler Stromversorgung werden nur Zweipulsgeräte betrieben, die die größte Abweichung der Effektivspannung von der Spitzenspannung zeigen (vgl. 2.2.3.5). Dies ist bei der Wisconsin-Kassette berücksichtigt, die größtmögliche Abweichung beträgt nur noch bis zu 2 kV je nach Generatortyp.

2.3.2.3 Film und Belichtung

Wie bereits erwähnt, enthält die Wisconsin-Kassette optische Absorberschichten über den Reihen der Referenzpunkte. Die verwendete Folie hat einen schwächeren Verstärkungsfaktor als die der Ardran-Crooks-Kassette, was aber eine schärfere und kornärmere Zeichnung des Films ergibt (Folien führen zu detailärmeren Aufnahmen).

Durch das feinere Korn ist die Fläche des Referenzpunktes der Wisconsin-Kassette gleichmäßiger geschwärzt.

Die Aufteilung der Kassette in verschiedene Abschnitte läßt durch Variation der verschiedenen Absorberschichten eine bessere Anpassung an die verschiedenen Spannungsbereiche zu.

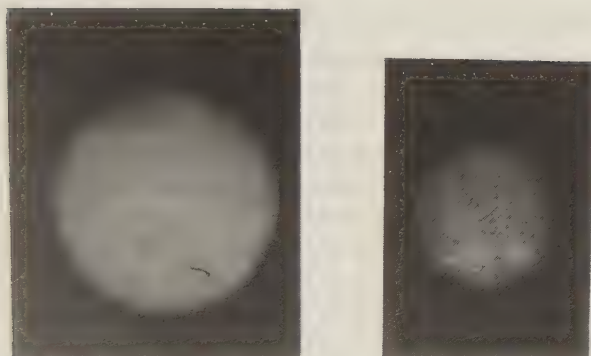


Abb. 10: Zwei exemplarische Schwärzungsbereiche aus je einer Aufnahme mit der Wisconsin-Kassette (links) und der Ardran-Crooks-Kassette (rechts). Beide wurden im gleichen Maßstab (6-fach linear) vergrößert.

Die Wisconsin-Kassette zeigte im praktischen Betrieb eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Belichtungsschwankungen (möglicherweise durch die Verwendung einer geringer verstärkenden Folie, die den Filmkontrast nicht so stark aufsteilt).

Die Angaben des Herstellers zur Belichtung führten in der Regel sofort zu guten Bildergebnissen, im Gegensatz zur Ardran-Crooks-Kassette. Die geringere Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen zeigt sich auch daran, daß nur eine Standardbelichtung pro Kassettenabschnitt angegeben ist (bei der Ardran-Crooks-Kassette muß für jede Spannung eine eigene Belichtungsdosis ermittelt werden).

2.3.2.4 Handhabung

Die Bedienung der Wisconsin-Kassette bringt einige Vorteile gegenüber der Ardran-Crooks-Kassette. Die fest auf der Kassette angebrachte Vorfilterung erspart das umständliche Anbringen an der Röntgenröhre (vgl. 2.2.3.6). Eine erhebliche Arbeitszeiterparnis für die Routineuntersuchung eines Röntgengerätes bringt die Aufteilung der Kassette in vier Abschnitte zur Spannungsmessung. Mittels zweier Bleibenden lassen sich die Teilabschnitte hintereinander belichten, es muß nicht wie bei der Ardran-Crooks-Kassette nach jeder Aufnahme die Dunkelkammer aufgesucht werden. Für die Archivierung ist die übersichtliche Darstellung von vier Meßergebnissen auf einem Film ebenfalls von Vorteil.

2.3.3 Kritik

Es hat sich gezeigt, daß die Wisconsin-Kassette einige Verbesserungen gegenüber der Ardran-Crooks-Kassette aufweist. Bestehen bleiben u. a. Schwierigkeiten mit der Streuung der Schwärzungsdichten der Referenzpunkte, wie sie unter 2.2.3.2 bereits dargelegt wurden; die Abhängigkeit war aber geringer als bei der Ardran-Crooks-Kassette. Die Herstellerfirma empfiehlt, möglichst benachbarte Referenzpunkte zur Bildung eines Mittelwertes auszuwählen. Dies ist praktikabel, wenn man die Spannungsmessung als Punktmessung innerhalb des Röhrenfokus betrachtet. Zu kritisieren ist ferner die immer noch ungenügende Differenzierung zwischen verschiedenen Generatortypen. Zwei Meßkurven sind noch zu wenig.

2.3.4 Erzielbare Genauigkeit

Die erzielbare Genauigkeit hängt wiederum von der möglichen Größe der einzelnen Fehlerquellen ab. Im Gegensatz zur Ardran-Crooks-Kassette ist die Genauigkeit im höheren Spannungsbereich sicherer. Die Abhängigkeit von der Röntgenvorfilterung bleibt allerdings genauso groß, da diese Kassette ebenfalls eine 1,5 mm dicke Cu-Vorfilterung besitzt.

Tab. 4: Aufstellung der Fehlerquellen bei der Messung mit der Wisconsin-Kassette; Abschätzung ihrer Größenordnung

Fehlerquelle	Größe des Fehlers bei 100 kV
Ablesegenauigkeit	$\pm 0,1$ kV
Fehler durch Interpolation	$\pm 0,25$ kV
Kurvenfehler	± 0
Generatorabhängigkeit	0 - 2,5 kV
Röhrenfilterung	$\pm 2,5$ kV

Es entsteht also ein mittlerer quadratischer Fehler von 3,6 kV, wobei der Fehler durch ein zu starkes Röhreneigenfilter nur bei hohen Spannungen auftritt und auch nur bei wenigen Röntgenröhren, da die meisten Anlagen eine Filterung im Bereich von 2 - 3 mm Al aufweisen.

2.4 Doppelkammermethode

2.4.1 Beschreibung

Zur Messung der Spannung mit der Doppelkammermethode, wie sie von Pychlau beschrieben wird (19), werden zwei miteinander gekoppelte Ionisationskammern in den Strahlengang der Röntgenröhre gebracht, wobei eine Kammer direkt hinter der anderen liegt. Die durch die Bestrahlung gebildeten Ladungen der Kammern können separat über eine Tor-Schaltung abgerufen und gezählt werden. Auf einem speziellen Gerät (Diamentor) wird die Ladungszahl dann digital angezeigt (Abb. 11).

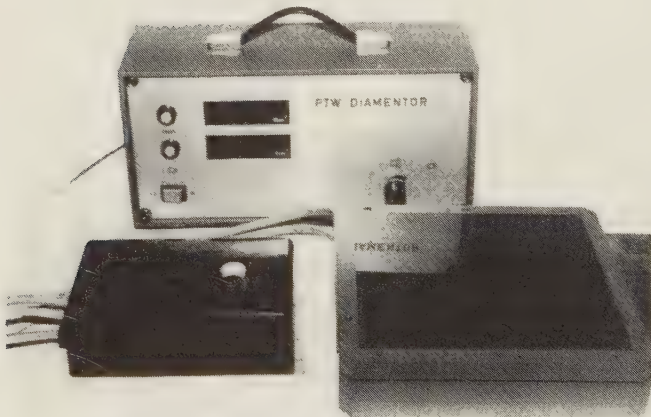


Abb. 11: Ansicht der benötigten Geräte zur Spannungsmessung mit der Doppelkammer. Rechts vorn die eigentliche Ionisationskammer mit Filtern im Zwischenraum, links davon die Tastapparatur zum Abrufen der Ladungen, im Hintergrund das Anzeigegerät Diamentor.

Zwischen die Kammern können diverse Filter eingelegt werden. Bei einem Filter (Cu 0,5 oder 1,0 mm) kann aus dem Quotienten (Q) der Ladungen der Kammern (K_1 und K_2) die Härte der emittierten Strahlung bzw. die Röhrenspannung ermittelt werden, sofern das Eigenfilter der Röhre bekannt ist.

Das Eigenfilter der Röhre muß dazu in einem Vorversuch ermittelt werden. Bei 90 kV im Durchleuchtungsbetrieb werden die Kammern dreimal bestrahlt, wobei hintereinander 1, 2 und 3 mm dicke Aluminium-Filter zwischen die Kammern gebracht werden. Es wird jeweils der Quotient gebildet und die drei Werte in eine Kalibrierkurve eingetragen, woraus dann das Eigenfilter abgelesen werden kann.

2.4.2 Leistungsfähigkeit

2.4.2.1 Meßbereich

Mit der Doppelkammer kann man, abhängig von der Dicke des Kupferfilters zwischen den beiden Kammern, in folgenden Bereichen messen:

mit 0,5 mm Cu	von 70 - 100 kV
mit 1,0 mm Cu	von 100 - 200 kV.

Im Vergleich zu den beiden besprochenen Kassetten ist der Meßbereich nach oben stark erweitert, beginnt aber erst bei einer relativ hohen Spannung von 70 kV.

2.4.2.2 Räumliche Integration

Da das Nutzstrahlenfeld der Röntgenröhre vollständig im Bereich der beiden Kammern liegt, wird bei dieser Methode räumlich integriert. Die Messung der Spannung stellt einen

räumlichen und zeitlichen Mittelwert dar, während bei den Kassetten nur zeitlich integriert wird. Schwankungen der Dosis innerhalb des Feldes, die bei den Kassetten zu den oben erwähnten Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Referenzpunktes führen, haben bei der Doppelkammermethode keine Bedeutung.

2.4.2.3 Stufenloses Messen

Bei den Kassettenaufnahmen erhält man abgestufte Meßpunkte, die definierten Spannungen entsprechen und zwischen denen interpoliert werden muß, die Doppelkammer arbeitet dagegen stufenlos (vermeidet damit die Fehlerquelle der Interpolation).

2.4.2.4 Dosisunabhängigkeit

Belichtungsprobleme wie bei den Kassetten gibt es bei der Doppelkammer nicht. Je länger man bestrahlt, umso mehr Zählerwerte erhält man. Große Zahlen sind von Vorteil bei der Bildung des Quotienten Q , um exakte Quotientenwerte zu erhalten. Bei den Filmen muß man dagegen Überbelichtungen vermeiden, weil diese nur schwer auszuwerten sind.

2.4.3 Kritik

2.4.3.1 Eigenfilterbestimmung

Der größte Nachteil der Doppelkammermethode besteht darin, daß sie nicht wie die beiden Kassetten und das unten vorgestellte Siemens kV-Meter vom Eigenfilter der Röhre weit-

gehend unabhängig ist. Eine Fehlerberechnung des Eigenfilters um 15% führt bereits zu einem Fehler in der Spannungsberechnung von 4%. Ohne zusätzlich bei der eigentlichen Spannungsmessung auftretende Fehler kommt dies bereits nahe an den Wert von 5% heran, der als maximale Spannungsabweichung nicht überschritten werden sollte. 15% Abweichung bei der Bestimmung des Filters sind möglich, da die zeichnerische Bestimmung sehr unsicher ist. Bei den hier gesammelten Erfahrungen lagen die Meßpunkte nie auf einer Geraden, es mußte immer versucht werden, eine mehr oder minder optimale Gerade zu finden, was bei nur drei Punkten sehr schwierig ist (vgl. Meßdiagramm Abb. 12). Durch die Wahl verschiedener Geraden ließen sich an den einzelnen Röhren Eigenfilterungen mit einer Ungenauigkeit zwischen 5 und 20% ermitteln.

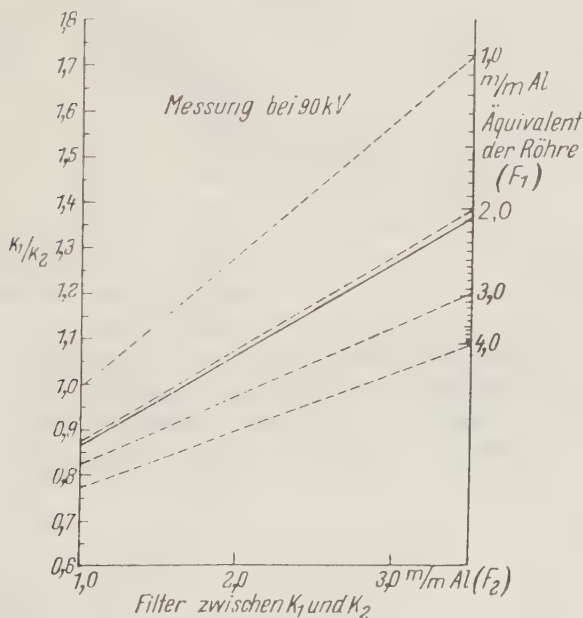


Abb. 12: Kalibrierkurve zur Bestimmung des Eigenfilters der geprüften Röntgenröhre mit Hilfe der Doppelkammer. Zur Berechnung des Eigenfilters wird mit drei verschiedenen Aluminium-Filtern (1,0, 2,0 und 3,0 mm) gemessen.

Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Eigenfilters bestehen darin, daß zum Zeitpunkt der Eigenfilterbestimmung, die bei einem festen Spannungswert von 90 kV erfolgen muß, nicht bekannt ist, inwieweit die eingestellte Spannung vom Generator eingehalten wird. Dies ist ja das eigentliche Ziel der späteren Spannungsmessung. Durch einen Nebenversuch (19) kann die Spannung etwas genauer bestimmt werden. Dieser Nebenversuch geht nun aber von einer bestimmten Eigenfilterung der Röhre aus. Ein befriedigendes Ergebnis ist hier nicht zu erwarten. Schwankungen von bis zu 6% sind durch den theoretischen Ansatz möglich. Zudem wird bestritten, daß eine Bestimmung des Eigenfilters, wie sie hier vorgenommen wird, überhaupt möglich ist. Nach Schaal (20) ist dies nur anhand der Kenntnisse über den genauen Aufbau der Röntgenröhre und aller Stoffe, die sich im Strahlengang befinden, möglich. Bei der Messung mit der Doppelkammer können Eigenabsorption der Röhre, Anodenwinkel und -rauigkeiten zu Fehlern führen (16, 20).

2.4.3.2 Anschlußbereich der Meßkurven

Für die Spannungsmessung mit der Doppelkammer werden zur Auswertung zwei Kalibrierkurvenscharen verwendet. Störend wirkte es sich aus, daß die zwei Kurven sich bei 100 kV nicht überlappen, sondern jeweils dort exakt enden bzw. beginnen (vgl. Abb. 13).

Eine dritte Meßkurve für 0,75 mm Cu brächte sicherlich bessere Ergebnisse in diesem Bereich.

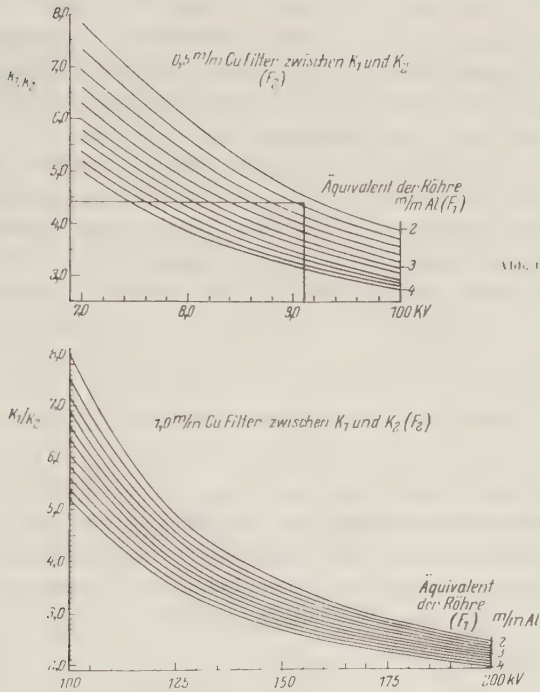


Abb. 13: Kalibrierkurven der Doppelkammer zur Spannungsmessung. Die oberen Kalibrierkurven dienen zur Spannungsmessung zwischen 70 und 100 kV (0,5 mm Cu zwischen den Kammern), die unteren zwischen 100 und 200 kV (1,0 mm Cu zwischen den Kammern). Man erkennt den exponentiellen Verlauf der unteren Kalibrierkurve.

Skepsis daran, ob der Meßbereich bei 100 kV wirklich überganglos verläuft, brachte ein nicht auszuwertendes Versuchsergebnis:

An einer Röntgenanlage (Siemens-Pandoros) wurde eine

Spannungsmessung bei einer eingestellten Sollspannung von 102 kV durchgeführt. Zuerst wurde die Kammer mit einem Kupferfilter von 0,5 mm Cu bestrahlt. Nach Auswertung der Kalibrierkurve ergab sich, daß die Spannung größer als 100 kV war, d.h. sie war mit dem Kupferfilter von 0,5 mm Cu nicht zu bestimmen, die Messung mußte mit einem Kupferfilter von 1 mm Cu wiederholt werden. Das Ergebnis dieses Versuchs ließ sich nun aber auch nicht in das Meßdiagramm über 100 kV eintragen, es ergab sich ein Wert, der unbestimmbar unter 100 kV lag. Wiederholungsmessungen führten zum gleichen unbefriedigenden Ergebnis.

2.4.3.3 Fehler bei der Bestimmung der Quotienten Q

Weil der Diamentor (Zählkammer) nur in ganzen Zähler-sprüngen arbeitet, können bei der Bestimmung des Quotienten Fehler auftreten. Dies möge folgendes Beispiel verdeutlichen, wobei die Zählerwerte der Kammern K_1 und K_2 nur um einen Wert verändert wurden:

Statt $Q = \frac{90}{20} = 4,5$ ergibt sich

$$Q = \frac{91}{19} = 4,79 \quad \text{oder} \quad Q = \frac{89}{21} = 4,24.$$

Daraus errechnet sich dann z.B. statt einer Spannung von 103,5 kV eine Spannung von 100 bzw. 106 kV.

Dieser Fehler kann auch bereits bei der Bestimmung des Eigenfilters eine Rolle spielen.

2.4.3.4 Ungleichmäßige Genauigkeit

Betrachtet man die Kalibrierkurven der Doppelkammer (s. Abb. 12), erkennt man den Verlauf, der besonders bei den Kurven über 100 kV besonders ausgeprägt ist. Dieser Kurvenverlauf bedingt, daß die Genauigkeit der Methode im Bereich über 150 kV nicht mehr sehr hoch ist. Folgendes Beispiel möge dies verdeutlichen:

Angenommen, es sei bei der Quotientenberechnung ein Fehler von + 0,2 entstanden (ein Fehler in der Größenordnung von 0,2 ist nicht extrem groß wie das Beispiel unter 2.4.3.3 zeigt), dann wirkt sich dieser Fehler in den verschiedenen Spannungsbereichen unterschiedlich stark aus:

bei	100 kV	:	+	2,0 kV,
bei	177 kV	:	+	23,5 kV.

Dieses Beispiel zeigt, daß der gegenüber den untersuchten Testkassetten erweiterte Meßbereich keinen entscheidenden Vorteil darstellt.

2.4.3.5 Kalibrierung

Wie bei den beiden Kassetten wird bei den Messungen der Typ des Generators nicht berücksichtigt. Die Kalibrierung der Doppelkammer ist unklar. Den Ausführungen Pychlaus (19) ist zu entnehmen, daß einerseits Kalibrierungen an einem Gleichstromgenerator vorgenommen wurden, andererseits aber auch Versuche an einem Sechspulsgerät stattfanden. Auf die zwangsläufigen Diskrepanzen, die bei Messungen an diesen unterschiedlichen Geräten auftreten sein müssen (vgl. auch 2.2.3.5), wird nicht eingegangen.

2.4.3.6 Dentalröntgengeräte

Da die üblichen Dentalröntgengeräte nur eine fest eingestellte Spannung besitzen, die weit unter den zur Eigenfilterbestimmung benutzten 90 kV liegt, ist eine Spannungsmessung mit der Doppelkammer hier nicht möglich.

2.4.3.7 Handhabung

Die Doppelkammer erwies sich als sehr unhandlich. Die Kammer mit Zuleitungskabel und Diamentor füllt den Raum eines "Waschkorbs" aus; bei Ortswechsel ist dies sehr störend, die Filmkassetten erwiesen sich hier als praktischer.

Störend ist der relativ hohe Zeitbedarf, bis das Eigenfilter bestimmt worden ist. Um geringe Fehler bei der Quotientenbildung zu erhalten (vgl. 2.4.3.3), sollten hohe Zählerwerte erreicht werden, die Auszählung ist dann sehr zeitraubend (bis zu einer Minute). Die eigentliche Auswertung anhand der Kalibrierkurven erfordert ebenfalls sehr viel Zeit. Da die Kalibrierkurven sehr groß sind (jeweils 30 x 60 cm), und die zeichnerische Auswertung mit einer gewissen Akribie durchgeführt werden muß, wird man am Ort der Messung keinen geeigneten Platz dafür finden. Man erhält also das Meßergebnis erst sehr spät.

2.4.4 Erzielbare Genauigkeit

Tab. 5: Zusammenstellung der Fehlerquellen bei der Messung nach der Doppelkammermethode; Abschätzung der Größenordnungen

Fehlerquelle	Größe des Fehlers bei 100 kV
Eigenfilterbestimmung (zeichner. Auswertung)	$\pm 4,0$ kV
Eigenfilter (theor. Ansatz)	$\pm 2,0$ kV
Quotientenbestimmung	$\pm 2,5$ kV (bis 25 kV im höchsten Spannungsbereich)
Generatortyp	0 - 4,5 kV

Es entsteht im Spannungsbereich bis 100 kV ein mittlerer quadratischer Fehler von 6,8 kV. Im höheren Spannungsbereich wirken sich alle Fehlerquellen stärker aus, dies ist insbesondere bedingt durch die Errechnung des Kammerquotienten.

2.5 Das Siemens-kV-Meßgerät

2.5.1 Beschreibung

Das Siemens-kV-Meter beruht auf der Zweifiltermethode, wie sie von Schaal (20) entwickelt und von Aichinger (24) zur Produktreife weiterentwickelt wurde. Das Meßprinzip der Zweifiltermethode ähnelt den anderen Methoden, weil auch hier die unterschiedliche Schwächung der Strahlung durch Kupferfilter zur Erlangung des Meßergebnisses (Strahlenhärte) ausgenutzt wird.

Die Röntgenstrahlung fällt hier durch zwei Kupferfilter unterschiedlicher Dicke (0,75 mm und 1,5 mm Cu) auf zwei CsJ-Detektoren, die dadurch zu Lichtemission angeregt werden und zwei Photowiderstände belichten. Deren unterschiedliche Signale werden verstärkt und daraus ein Quotient Q gebildet, der von der Spannung der Röhre abhängt. Das Gerät vergleicht den ermittelten Quotienten Q mit einer eingespeicherten Kalibrierkurve und zeigt dann das Ergebnis digital an. Die Kupferfilter sind so ausgelegt, daß einerseits ein großer Meßbereich überstrichen wird, und andererseits auch das dünnere Filter bereits so dick ist, daß sich eine von der Vorfilterung der Röhre weitgehend unabhängige Messung ergibt (20, 21).

2.5.1.1 Technische Ausführung

Das kV-Meßgerät besteht aus zwei Teilen, dem Detektorteil und der Auswerte- und Anzeigeeinheit, die durch ein 5 Meter langes Kabel verbunden sind. Im Detektorteil sind die Kupferfilter, die CsJ-Kristalle, sowie die Photodioden enthalten. Befestigt wird die Detektoreinheit mit Hilfe einer Schablone, die in die Filterhalter der üblichen Röhren paßt. Ein abnehmbares Bleifilter ermöglicht die

Anpassung an verschiedene Dosisleistungen. Neben einer guten Handhabung ermöglicht die Schablone eine exakt senkrechte Ausrichtung des Detektors zum Zentralstrahl der Röhre, was Grundvoraussetzung für eine genaue Messung ist. Die Auswerte- und Anzeigeeinheit (s. Abb. 14) wertet die Signale der Photodioden nach Verstärkung aus und zeigt das Meßergebnis auf einer dreistelligen Digitalanzeige mit einer Abstufung von 0,5 kV (ab 100 kV beträgt die Abstufung 1 kV) an. Es können zwei Meßbereiche mit einem Bereich von 50 - 85 kV bzw. von 77 - 150 kV ausgewählt werden. Zusätzlich ist eine Berücksichtigung des Generatortyps möglich (Zwei-, Sechs-, Zwölfpuls und Gleichstrom). Ist die Dosisleistung zu groß bzw. zu niedrig, blinkt das Gerät mit der Anzeige 888 bzw. 000.

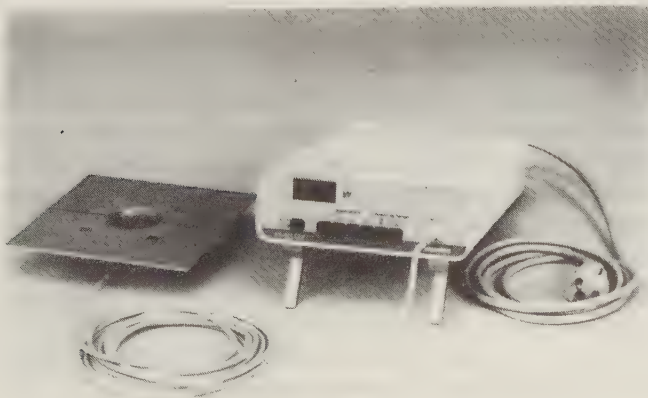


Abb. 14: Das Siemens-kV-Meßgerät, bestehend aus dem Detektorteil, der in eine Grundplatte eingebaut ist, die in die üblichen Filterhalter der Röntgenröhren paßt und aus der die Auswerte- und Anzeigeeinheit, die über ein 5 Meter langes Koax-Kabel mit dem Detektorteil verbunden ist.

2.5.2 Leistungsfähigkeit

2.5.2.1 Meßbereich, Abhängigkeit von der Röhrenvorfilterung

Das Siemens-kV-Meter hat einen Meßbereich von 50 - 150 kV, dies ist etwas mehr als bei der Wisconsin-Kassette (47 - 129 kV). Die Ardran-Crooks-Kassette hat einen Meßbereich von 40 - 155 kV, erfaßt also etwas niedrigere Spannungen. Die Messung dieser niedrigen Spannungen erfolgt aber bei einer Vorfilterung von nur 0,35 mm Cu, die zur Folge hat, daß das Meßergebnis sehr stark von der Vorfilterung der Röhre abhängig ist (20, 21, 24). Beim Siemens-kV-Meter ist im Gegensatz zu den Kassetten präzise angegeben, auf welche Vorfilterung sich die Messungen beziehen (2,5 mm Al). Bei einer zusätzlichen Filterung von 5 mm Al, wie sie allerdings sehr selten vorkommt, beträgt der maximale Fehler + 3%. Bei den Kassetten tritt zweifellos ein ähnlicher Fehler auf, die Hersteller machen darüber jedoch keine genaueren Angaben.

Der Meßbereichsumfang des kV-Meters erreicht nicht die hohen Spannungen wie die Doppelkammer (200 kV). Wie bereits oben erwähnt, ist aber in diesem Bereich die Meßgenauigkeit der Doppelkammer bereits reduziert. Für Röntgendiagnostikgeräte ist dieser Bereich auch von untergeordneter Bedeutung (die meisten Geräte erreichen eine maximale Spannung von 125 kV).

2.5.2.2 Handhabung, Reproduzierbarkeit

Das Siemens-kV-Meßgerät bietet den größten Bedienungs-komfort der untersuchten Geräte. Das Ergebnis wird sofort nach dem Auslösen der Strahlung angezeigt, es sind keine Zusatzeinrichtungen wie Densitometer, keine Rechnungen, keine graphischen Auswertungen notwendig, die

Zeitersparnis ist dadurch sehr groß. Es können deshalb an einem Gerät innerhalb kurzer Zeit sehr viel mehr Messungen durchgeführt werden, man erhält die Möglichkeit, die Reproduzierbarkeit sowohl des Meßgeräts als auch der Röntgenanlage zu überprüfen. Bei Messungen an einem Pandoros-Generator (Siemens), der bedingt durch seine Bauweise (Einzelbaugruppen für jede Spannung) eine sehr genaue Reproduzierbarkeit der Spannung ermöglicht, zeigte sich, daß das Siemens-kV-Meßgerät eine gute Reproduzierbarkeit besitzt (Einzelheiten unter 4.1).

Es zeigte sich auch, daß das Einlegen des Meßdetektors in den Kollimator das Meßergebnis nicht beeinflußt. Sogar leichte Fehllagen, auf deren Vermeidung der Hersteller besonders hinweist, brachten keine gravierenden Fehlergebnisse.

2.5.2.3 Generatorabhängigkeit, Kalibrierung

Als einziges der erprobten Systeme berücksichtigt das Siemens-kV-Meßgerät die Pulsform des Generators. Es wird ebenfalls integrierend gemessen, das Gerät berechnet dann nach Eingabe des Generatortyps automatisch die Spitzenspannung. Die Kassetten und die Doppelkammer nehmen darauf keine Rücksicht und ermöglichen damit keinen exakten Vergleich von Röntgengeräten in Bezug auf die Spannung. Das kV-Meter ist das einzige der untersuchten Verfahren, bei dem exakt die Kalibrierquelle angegeben ist (Gleichstromgenerator, Gamma-Spektrometer).

2.5.2.4 Dosisabhängigkeit

Das Siemens-kV-Meßgerät ist nicht wie die Doppelkammer vollkommen unabhängig von der Dosis, aber ein bequemes Arbeiten wird dadurch erreicht, daß bei Unter- bzw. Überschreiten der Dosis sofort die Digitalanzeige blinkt. Durch Verändern der mAs-Größe kann sofort (ohne Zeitverzögerung wie bei den Kassetten) eine Wiederholungsmessung durchgeführt werden.

2.5.3 Kritik

2.5.3.1 Durchleuchtungsbetrieb, Dentalröntgengeräte

Mit dem Meßgerät ist keine Messung der Spannung im Durchleuchtungsbetrieb möglich, 56 kV-Zahnfilmgeräte können wegen zu geringer Dosisleistung ebenfalls nicht gemessen werden.

Anzumerken ist aber, daß es bis heute technisch noch mit keinem Gerät realisiert werden konnte, die Spannung im Durchleuchtungsbetrieb auf indirekte Weise zu messen, weil zu geringe Ströme fließen.

2.5.3.2 Meßbereich

Für die Mammographie, die eine sehr genaue Einhaltung der Spannung fordert, wäre es wünschenswert, wenn der Meßbereich des Geräts unter 50 kV ausgedehnt würde. Diese Forderung steht allerdings im Gegensatz zum Wunsch des Herstellers, ein möglichst preisgünstiges Gerät anzubieten (28).

2.5.3.3 Bleibende

Die den Kupferfiltern bei hoher Dosis vorgeschaltete Bleibende kann durch kleinste Strukturfehler - wie z.B. Kratzer im Blei - zu Verfälschungen des Meßergebnisses führen. Die Hersteller haben diese Schwachstelle bereits erkannt und wollen in der späteren Serienfertigung die Bleibende ersetzen. Sie sehen dafür eine elektrisch umschaltbare Dosisanpassung vor, die auf der Änderungsmöglichkeit des Verstärkungsfaktors des Eingangssignals basiert.

2.5.3.4 Absolute Meßgenauigkeit, Eingabe der Pulsform

Das Siemens-kV-Meßgerät zeigt sehr starke Verbesserungen gegenüber den Testkassetten und der Doppelkammer. Es mißt jedoch ebenfalls integrierend, d.h., daß die angezeigte Spannung ebenfalls nur einen Mittelwert darstellt. Dieser Mittelwert stellt zwar durch die Wahlmöglichkeit der Pulswellenform einen "mittleren Spitzenwert" dar, aber die tatsächlichen Spannungsspitzen werden nicht gemessen. Für höchste technische Ansprüche gibt es inzwischen Geräte (Digi-X, Scanditronix, Keithly, Victoreen), die den realen Spannungsverlauf in jeder Phase des Röntgenblitzes messen. Differenzen zu den realen Werten können mit dem Siemens-kV-Meter auch auftreten, wenn der geprüfte Generator eine andere Pulscharakteristik hat als die vier vorgesehenen Programme (z.B. Sägezahnspannung).

2.5.4 Erzielbare Meßgenauigkeit

Es gibt im wesentlichen zwei Fehlermöglichkeiten beim Siemens-kV-Meter:

	Größe des Fehlers bei 100 kV
Abhängigkeit von der Vorfilterung der Röhre	0 - 2,5 kV
Rundungsfehler beim An- zeigen des Meßergebnisses	$\pm 0,25$ kV

Es entsteht ein mittlerer quadratischer Fehler von 2,54 kV.

Eine andere Fehlerquelle wäre die Benutzung ungebräuchlicher Generatortypen (siehe oben), was aber nur Änderungen im Bruchteil eines kV bewirken würde.

3. Meßergebnisse

Die Meßmethoden wurden an verschiedenen Röntgenröhren (Klinikum Nürnberg - Radiologisches Zentrum, Röntgenabteilung der Inneren Medizin der Universitätsklinik Erlangen, Institut für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg, Röntgenabteilung der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkranke der Universität Erlangen-Nürnberg, sowie in einem Versuchslabor der Firma Siemens Erlangen) verglichen. Die Auswahl der Geräte erfolgte mehr oder minder zufällig, es wurde nur darauf geachtet, daß alle gängigen Generatortypen vertreten waren. Es folgt eine Aufstellung der gemessenen Geräte, wobei Kurzformeln für die einzelnen Geräte eingeführt werden für spätere Verweisungen.

Tab. 6: Geprüfte Röntgengeräte

- 1) Pandoros-Gleichspannungsgenerator (Klinikum Nürnberg)
- 2) Tridoros-Optimatic-Generator, Multiplantigraph (Med. Klinik Erlangen)
- 3) Tridoros-Optimatic-Generator, B I, "Niere", (Med. Klinik Erlangen)
- 4) Tridoros-Optimatic-Generator, B II "Knochen", (Med. Klinik Erlangen)
- 5) Polyphos-Mittelfrequenzgenerator (Versuchslabor der Firma Siemens Erlangen)
- 6) Gigantos-Generator, B I (Klinikum Nürnberg, Rö 16)
- 7) Gigantos-Generator, B II (Klinikum Nürnberg, Rö 16)
- 8) Gigantos-Generator, B III (Klinikum Nürnberg, Rö 16)
- 9) Gigantos-Generator (Klinikum Nürnberg, Rö 3)
- 10) Tridoros 4-Generator (Klinikum Nürnberg, Rö 11)
- 11) Tridoros 4-Generator (Institut für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg)
- 12) Heliodent-Dentalröntgengerät 56 kV (Zahn-, Mund- und Kieferklinik Erlangen)
- 13) Heliodent-Dentalröntgengerät 70 kV (Zahn-, Mund- und Kieferklinik Erlangen)
- 14) Stabilipan-Gleichstromgenerator - Therapiegerät Institut für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg)

Der Pandoros-Generator ist das einzige Gleichspannungs-
gerät, der Polyphos-Generator der einzige Mittelfrequenz-
generator der hier untersuchten Geräte. Die Generatoren
des Typs Tridoros sind Sechspulsgeräte, die des Typs
Gigantos Zwölfpulsgeräte, die Dentalröntgengeräte sind
Zweipulsgeneratoren, der Stabilipan ist das einzige
Therapiegerät der hier untersuchten Geräte.

Tab. 7: Meßergebnisse an den einzelnen Generatoren

Generator	Meßmethode	Eingestellte Spannung			
		60 kV	70 kV	81 kV	102 kV
1) Pandoros- Gleichspannungs- generator	Sie	58,5	68-68,5	78-78,5	97-98
	Wis	60,5	69,5	79	99
	DK	--	72	83,5	101,5
	AC	63,5	72,5	83,5	105,5
2) Trid.Opt. Multiplanti- graph	Sie	63-64,5	69-71,5	77-79,5	99,5-103
	Wis	63	71,5	78	100
	DK	--	71,6	82	101
	AC	70,5-72,5	79	86	115
3) Trid.Opt. B I "Niere"	Sie	67-69,5	75-78	82-89,5	106-108
	Wis	67	71,5	81,5	104,5
	DK	--	--	--	--
	AC	68,5-70,5	73-74,5	88,3	112
4) Trid.Opt. B II "Knochen"	Sie	60,5-61,5	65,5-66,5	71-73,5	90,5-97
	Wis	61,5	66	73	95
	DK	--	--	--	--
	AC	64	70	77,5	94
5) Polyphos- Mittelfrequenz- generator	Sie	60,5-61,5	70-70,5	81,5-82	102-103
	Wis	60,5	70,5	81	100
	DK	--	74,5	82,5	102
	AC	65,8	75	86	107

Fortsetzung Tab. 7

Generator	Meßmethode	Eingestellte Spannung			
		60 kV	70 kV	81 kV	102 kV
6) Gig. Generator B I Rö 16	Sie	57,5-67,5	68,5-76	75-84	92,5-99
	Wis	63	71,5	80	95,5
	DK	--	72,5	79-83	100
	AC	66,5	75	84,5	101
7) Gig. Generator B II Rö 16	Sie	59-66	70,5-74	77-82	95-117
	Wis	64,5	75	79-87,5	96
	DK	--	74-78	80-83	112-115
	AC	58,3-60	68,5-79	80-89,5	122
8) Gig. Generator B III Rö 16	Sie	62,5-74	72-87	84-89,5	101-108
	Wis	66,5	75-83	84-95	104,5
	DK	--	78-86,5	95	106-112
	AC	72,5	82-84	86-92	101-128
9) Gig. Generator Rö 3	Sie	54,5-59	67-72,5	73,5-78,5	97,5-100
	Wis	59	70	77,5	98,5
	DK	--	72	81,3	101
	AC	63,5	72,5	83,5	106
10) Trid. 4- Generator Rö 11 Nürnberg	Sie	64-67,5	72-75	80-84	102-106
	Wis	66,2	73	83,5	105
	DK	--	79,5	89,5	106,5
	AC	68	74,8	86	108,3

Fortsetzung Tab. 7

Generator	Meßmethode	Eingestellte Spannung			
		60 kV	70 kV	81 kV	102 kV
11) Trid. 4-Generator Erlangen	Sie	56,5-62	68-71	78,5-85,5	104-106
	Wis	64,5	71,5	80	102,2
	DK	--	70	80,5	102
	AC	61-64,5	71,8	81,5	104
12) Heliiod. 56 kV 13) Heliiod. 70 kV	Sie	--	68,5-71,5		
	Wis	58,5	71		
	DK	--	--		
	AC	50,7	69,9		
14) Stabilipan Therapiegerät	Sie	--	--	--	--
	Wis	--	69	73,5	95
	DK	--	70	78	97
	AC	--	69,3	79	96

Tab. 8: Relative Schwankung der Spannung an den verschiedenen Arbeitsplätzen, ermittelt mit dem Siemens-kV-Meter

Röntgenröhre	Eingestellte Spannung			
	60 kV	70 kV	80(81 kV)	100(102 kV)
Pand./Nbg.	0%	1,5%	0,6%	1,0%
Trid.Opt. Multipl.	2,4%	3,6%	3,2%	3,5%
Trid.Opt. B I "Niere"	3,7%	4,0%	9,0%	2,0%
Trid.Opt. B II "Knochen"	2,5%	1,5%	3,5%	6,5%
Polyph. Siemens	2,5%	0,7%	1,2%	1,0%
Gig. BI, Rö 16	17,0%	10,9%	12,0%	7,0%
Gig. B II Rö 16	11,9%	5,0%	6,5%	23,3%
Gig. B III Rö 16	18,4%	20,8%	13,2%	7,4%
Gig. Rö 3	8,3%	8,2%	6,8%	2,5%
Trid. 4 Rö 11, Nbg.	5,4%	4,0%	5,0%	3,9%
Trid. 4 Radiol.Erlg.	9,7%	4,4%	8,9%	2,0%
Heliod. 70 kV	--	4,4%	--	--

Für einige Generatoren wurde die Abweichung des Meßergebnisses vom eingestellten Sollwert bei den einzelnen Meßmethoden ermittelt. Um einen übersichtlichen Vergleich der Meßmethoden zu ermöglichen, wurde außerdem die Abweichung der Spannung untereinander ermittelt.

Tab. 9: Abweichung der Meßergebnisse von den Sollwerten

Meßmethode		60 kV	70 kV	80 (81 kV)	100 (102 kV)
<u>a) Pandoros-Generator</u>					
Abweichung vom Soll	Sie	-2,8	-2,4	-3,2	-4,5
	Wis	+0,8	-0,7	-2,5	-2,9
	DK	--	+2,9	+3,1	-0,5
	AC	+5,8	+3,6	+3,1	+3,4
Abweichung vom Siemens-Gerät	Wis	+3,8	+1,8	+0,8	+1,6
	DK	--	+6,3	+6,5	+4,2
	AC	+8,9	+6,1	+6,5	+7,9
<u>b) Polypbos-Generator</u>					
Abweichung vom Soll	Sie	+1,2	+0,7	+1,2	+0,5
	Wis	+0,8	+0,7	+0	+2,0
	DK	--	+6,5	+1,9	+0
	AC	+9,7	+7,1	+6,2	+4,9
Abweichung vom Siemens-Gerät	Wis	+0,4	+0	+1,2	+2,5
	DK	--	+5,8	+0,7	+0,5
	AC	+8,5	+6,4	+5,0	+4,4

Fortsetzung Tab. 9:

	Meßmethode	Abweichung in % bei eingestellter Sollspannung von			
		60 kV	70 kV	80 (81 kV)	100 (102 kV)
c) <u>Multiplantigraph</u>					
Abweichung vom Soll	Sie	+6,2	±0,3	±3,3	±0,8
	Wis	+5,0	+2,1	±3,7	±2,0
	DK	--	+2,2	+1,2	±1,0
	AC	+19	+12,9	+6,2	+13,7
Abweichung vom Siemens-Gerät	Wis	±1,2	+1,8	±0,4	±1,2
	DK	--	+1,9	+4,5	±0,2
	AC	+12,8	+12,6	+9,5	+14,5
d) <u>Trid.4 Erlangen</u>					
Abweichung vom Soll	Sie	±1,2	±0,7	+4,4	+5
	Wis	+3,3	+2,1	+0	+2,2
	DK	--	+0	+0,6	+2,0
	AC	+4,5	+2,6	+1,9	+4
Abweichung vom Siemens-Gerät	Wis	+4,5	+2,8	±4,4	±2,8
	DK	--	+0,7	±3,8	±3,0
	AC	+5,7	+3,3	±2,5	±1,0

Tab. 10: Meßwerte am Gigantox-Generator im Klinikum Nürnberg (NS 16). Da dieser Generator sehr unterschiedliche Spannungsweite erbrachte, wurden hier die Messungen an verschiedenen Taten mit den verschiedenen Röhren durchgeführt. Die Dokumentation der Einzelmessungen zeigt die sehr schlechte Reproduktionsfähigkeit des Generators. Die Messungen wurden mit dem Siemens-KV-Meter durchgeführt.

	Eingestellte Spannung (kV)	Gemessene Spannung (kV) am		
		14. 1.	18. 1.	22. 1.
B I	60	67,5	57,7	60
	70	76	70	68,5
	80	80,5	77	76
	100	98,5	95,5	90,5
B II	60	66	60	61,5
	70	74,5	70,5	72
	80	80,5	81,5	79
	100	98	96,5	97
B III	60	74,5	74	70
	70	82	83	78
	80	93	84,5	86,5
	100	106	104	102

Zum Vergleich der Anlagen wurden die Spannungen 60, 70, 80 bzw. 81 und 100 bzw. 102 kV gewählt. Die Spannungen 81 und 102 kV gelten für Geräte, bei denen die Spannung nicht stufenlos eingestellt wird, sondern bei denen nur diskrete Schaltstufen (digital angezeigt) möglich sind. Die Dentalröntgengeräte besitzen nur eine fest eingestellte Spannung. Wenn aus technischen Gründen mit einer Methode keine Messung möglich war, ist dies durch einen Strich in der Tabelle gekennzeichnet. Generell ist zu sagen, daß die Doppelkammer erst ab 70 kV Messungen erlaubt.

Für einige Geräte wurden zusätzlich Reproduktionsmessungen oder Messungen zu mehreren Terminen durchgeführt. Ebenso wurden exemplarisch Abweichungen der Messung vom eingestellten Sollwert und ein Vergleich der Meßergebnisse untereinander durchgeführt. Auf die Ergebnisse wird in Abschnitt 4. bei den einzelnen Geräten näher eingegangen.

4. Diskussion der Meßergebnisse an verschiedenen Röntengeräten

Im folgenden werden die Meßergebnisse an den einzelnen Generatoren näher betrachtet und in Tab. 11 kurz zusammengefaßt.

4.1 Pandoros-Gleichspannungsgenerator (Klinikum Nürnberg - Radiologisches Zentrum)

Das Siemens-kV-Meßgerät zeigt eine relativ gute Übereinstimmung mit den am Generator eingestellten Werten; auffallend ist nur die mit zunehmender Spannung ebenfalls zunehmende Abweichung, die auf einen systematischen Kalibrierfehler entweder am Gerät oder am Generator schließen läßt. Die Meßergebnisse mit der Wisconsin-Kassette zeigen hier eine bessere Übereinstimmung. Die Doppelkammer und insbesondere die Ardran-Crooks-Kassette erbringen zu hohe Spannungswerte.

Die Überprüfung der Reproduzierbarkeit, die nur mit dem Siemens-kV-Meter durchgeführt wurde, zeigte eine nur sehr geringe Schwankung der Spannungen. Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß das Siemens-Meßgerät eine sehr hohe Konstanz besitzt (abgesehen von dem oben erwähnten möglichen Kalibrierfehler, der nur mit dem Gamma-Spektrometer geklärt werden kann).

Die größte gemessene Abweichung war 1 kV (1,5%), wobei zu berücksichtigen ist, daß das Gerät nur in Stufen von 0,5 kV (bzw. 1 kV über 100 kV) anzeigt. Die Differenz wäre u.U. bei genauerer Anzeige noch geringer.

Diese guten Reproduktionsergebnisse erlauben es, die bei anderen Messungen auftretenden großen Schwankungen dem jeweiligen Generator und nicht dem Meßgerät zuzuschreiben.

Am selben Generator wurde auch (zu einem anderen Zeitpunkt) untersucht, ob die Anbringung des Detektors in verschiedener Lage an der Röntgenröhre das Meßergebnis beeinflussen kann. Die Detektorplatte wurde zu diesem Zweck immer wieder neu eingelegt, wobei sich keine Änderung zeigte. Auch absichtliche Fehllagen, auf deren Vermeidung in der Betriebsanleitung besonders hingewiesen wird, brachten keine nennenswerten Veränderungen. Es wurde zum Kalibrieren die Kathoden-Anodenseiten vertauscht, zum anderen wurde die Detektorplatte absichtlich aus der Senkrechten zum Zentralstrahl ausgelenkt. Beide Fehlpositionen sind aber so auffällig sichtbar, daß sie in der Praxis wohl kaum vorkommen werden.

Auffällig abweichend waren die Meßergebnisse mit der Ardran-Crooks-Kassette, die an mehreren Geräten zu hoch waren. Diese Abweichungen waren noch erheblich größer als sie nach den möglichen Fehlerquellen zu erwarten waren.

Am Pandoros-Generator wurden auch von Rehm (29) Messungen mit einer Testkassette desselben Typs durchgeführt, die erheblich besser mit den Solldaten und den Ergebnissen der Wisconsin-Kassette und des Siemens-kV-Meters übereinstimmten. Das legt den Schluß nahe, daß das hier verwendete Exemplar einen Kalibrierfehler aufweist, oder durch Lagerungsbedingungen im Lauf der Zeit eine Veränderung der Verstärkerfolien aufgetreten ist (vgl. 2.2.3.5).

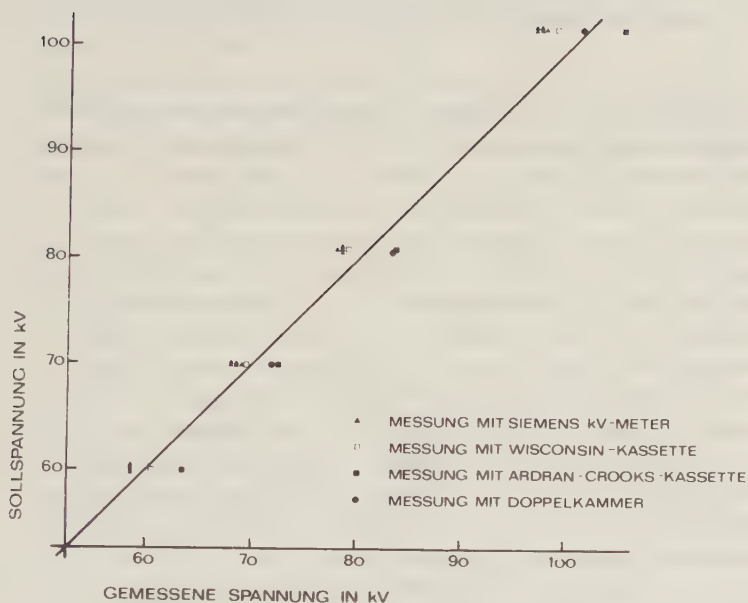


Abb. 15: Die Messungen am Pandoros-Generator. Man erkennt die guten Reproduktionseigenschaften des Pandoros durch Wiederholungsmessungen mit dem Siemens-kV-Meter. Gute Übereinstimmung mit der Wisconsin-Kassette. Wesentlich höhere Meßwerte mit der Doppelkammer und insbesondere mit der Ardran-Crooks-Kassette.

4.2 Tridoros-Optimatic-Generator mit drei Arbeitsplätzen in der Röntgenabteilung der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen

Die Messungen an drei Röhren in der Röntgenabteilung der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen brachten eine überraschende Erkenntnis: Obwohl alle drei Röhren an einem einzigen Tridoros-Optimatic-Generator betrieben werden, zeigten sie sehr unterschiedliche Spannungen bei gleichem eingestellten Sollwert an. Diese Unterschiede können sich zum Teil durch unterschiedlich lange Zuleitungskabel vom Generator zur Röhre ergeben (lange Kabel wirken frequenzdämpfend und erhöhen damit die Effektivspannung), zudem kann jede Röhre in gewissen Grenzen individuell einreguliert werden. Die Unterschiede im vorliegenden Fall betrugen bis zu 15 kV, wobei Röhre I (für Nierenaufnahmen) die höchsten, Röhre II (für Knochenaufnahmen) die niedrigsten aufwies. Diese beiden Röhren konnten mit der Doppelkammer nicht gemessen werden, weil ihr Eigenfilter so hoch war, daß er in der Kalibrierung der Doppelkammer nicht mehr vorgesehen war.

Die Ardran-Crooks-Kassette zeigt wieder zu hohe Spannungen an, die im Falle der Multiplantigraph-Röhre bis zu 14,5% höher liegen als beim Siemens-kV-Meter. Bei Röhre II (Knochenaufnahmen) ist die Übereinstimmung gut.

Bei derselben Röhre zeigt das Siemens-kV-Meter Spannungen an, die deutlich höher liegen als die der Wisconsin-Kassette, zu der sonst immer gute Übereinstimmung besteht. Dies mag daran liegen, daß die Vorfilterung dieser Röhre weit über 4 mm Al liegt, wie sich aus den Messungen mit der Doppelkammer ergibt (ein exakter Wert ist nicht zu ermitteln, weil die Kalibrierung für die Doppelkammer nur bis zu 4 mm Al reicht). Im Falle einer sehr starken Vorfilterung gibt der Hersteller selbst einen möglichen Meßfehler bis zu 3% an (24). Eine Überprüfung der Reproduktionsgenauigkeit ergibt für die Multiplantigraph-Röhre

die gleichmäßigsten Werte (2,4 - 3,6%), bei Röhre II (Knochenaufnahmen) tritt eine Schwankung von maximal 6,5% auf, wogegen bei der Röhre I (Nierenaufnahmen) im 80 kV-Bereich während einer Meßreihe ein Sprung von 9% vorkam. Das Bedienungspersonal hatte bereits über manchmal unerklärliche Fehlaufnahmen bei diesem Gerät geklagt.

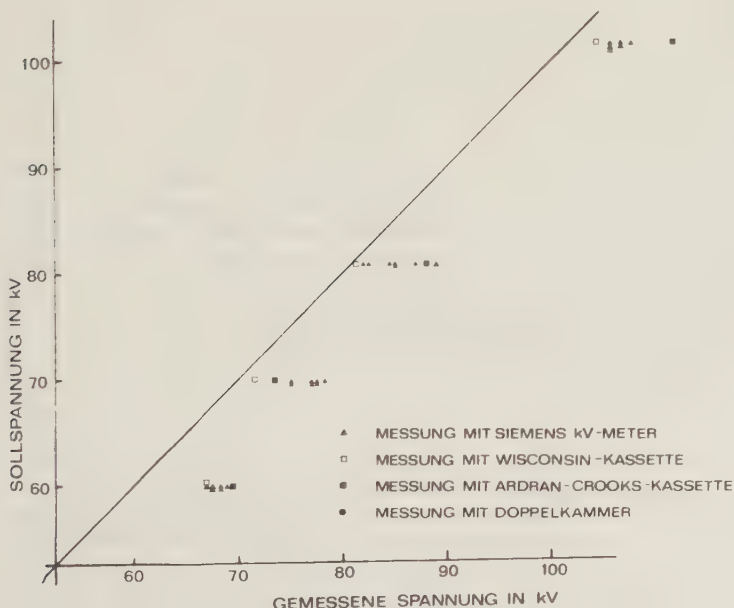


Abb. 16: Meßergebnisse an der Multiplantigraph-Röhre des Tridoros-Optimatic-Generators. Gute Reproduktionseigenschaften, die jedoch den Pandoros- und den Polyphos-Generator nicht erreichen. Die Meßergebnisse mit der Wisconsin-Kassette liegen im Intervall, das durch Wiederholungsmessungen mit dem Siemens-kV-Meter ermittelt wurde. Die Doppelkammer zeigt bei 70 und 80 kV geringfügig, die Ardran-Crooks-Kassette in allen Bereichen erheblich höhere Spannungen an.

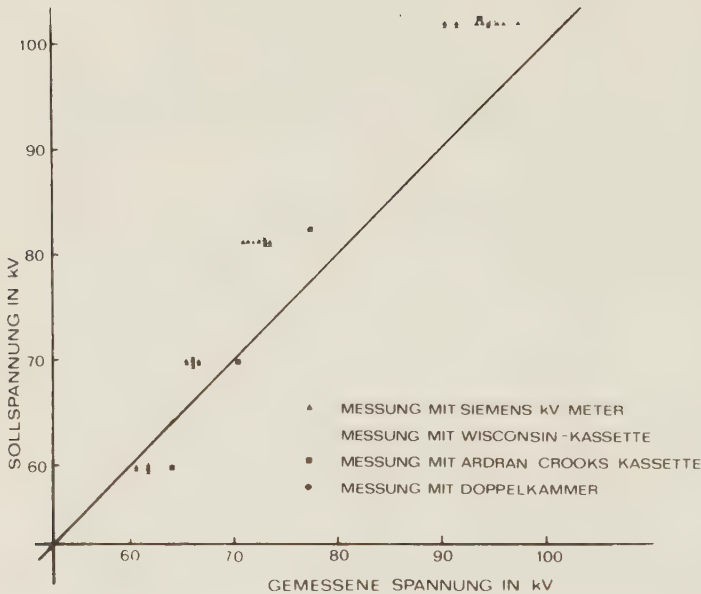


Abb. 17: Messungen an der Röhre II (Knochenaufnahmen) des Tridoros-Optimatic-Generators in der Röntgenabteilung der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen. Sehr gute Reproduktionseigenschaften bei 60, 70 und 81 kV. Bei 102 kV erstaunlicherweise weitaus größere Streuung. Die Messungen mit der Wisconsin-Kassette liegen überall im Bereich der Messungen mit dem Siemens-kV-Meter, die Meßwerte mit der Ardran-Crooks-Kassette liegen bei 60, 70 und 81 kV weit darüber, bei 102 kV innerhalb davon; mit der Doppelkammer konnten wegen der starken Vorfilterung der Röhre keine Messungen gemacht werden.

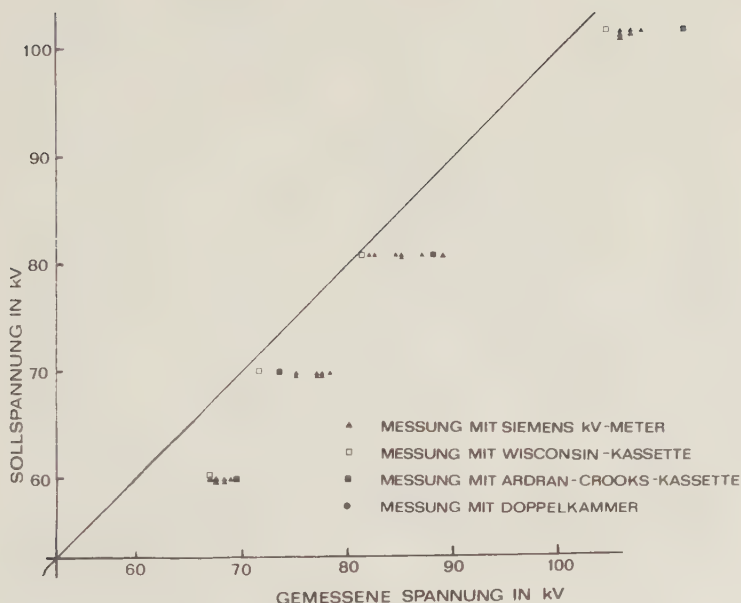


Abb. 18: Messungen an der Röhre I (Nierenaufnahmen) des Tridoros-Optimatic-Generators in der Röntgenabteilung der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen. Die Reproduktionseigenschaften sind schlechter als bei der am gleichen Generator betriebenen Multiplantigraph-Röhre. Die Meßergebnisse mit der Wisconsin-Kassette liegen niedriger als die Meßwerte mit dem Siemens-kV-Meter, diejenigen mit der Ardran-Crooks-Kassette einmal höher, einmal niedriger. Mit der Doppelkammer konnte wegen der starken Vorfiltrierung der Röhre keine Messung durchgeführt werden. Durchschnittlich höhere Spannungen.

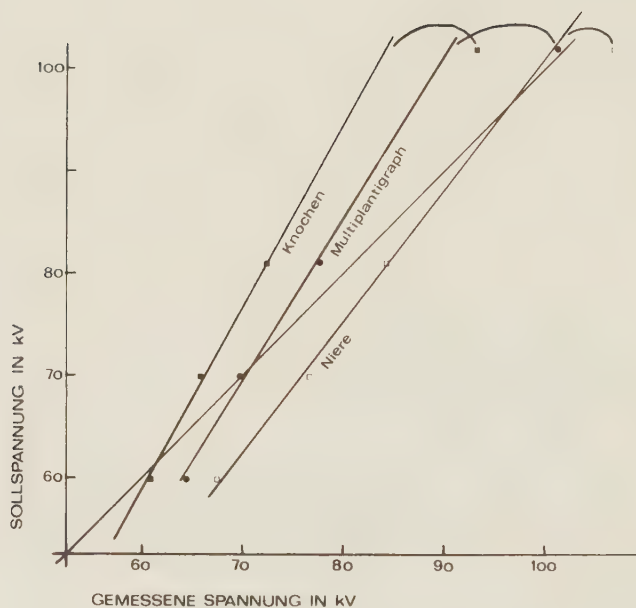


Abb. 19: Vergleich der drei an einem Tridoros-Optimatic-Generator betriebenen Röhren der Röntgenabteilung der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen, wobei die Mittelwerte der Messungen mit dem Siemens-kV-Meter herangezogen wurden. Deutlich ist das unterschiedliche Verhalten der drei Röhren zu erkennen. Die jeweils niedrigsten Spannungen erzeugte die Röhre I (Nierenaufnahmen), die höchsten die Röhre II (Knochenaufnahmen), dazwischen lag die Multiplantigraph-Röhre. Auffällig ist, daß die Meßwerte bei 60, 70 und 81 kV bei jedem Gerät auf einer Geraden liegen (die drei Geraden sind annähernd parallel), während der Meßwert bei 102 kV deutlich höher liegt.

4.3 Polyphos-Generator im Versuchslabor der Firma Siemens AG, Erlangen

Der Polyphos-Generator läßt sich nicht in das Schema der üblichen Generatoren einordnen. Seine Spannung oszilliert mit einer Frequenz von einigen Kilohertz. Die Hersteller empfehlen, ihn bei der Messung wie einen Zwölfpuls-generator zu behandeln.

Die Messungen mit dem Siemens-kV-Meter in der Zwölfpuls-Einstellung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den eingestellten Werten, die Abweichung beträgt nur zwischen 0,5 und 1,2%. Dies zeigt wiederum, daß eine weitere Differenzierung der Einstellmöglichkeiten an diesem Meßgerät in der Praxis kaum notwendig sein wird. Die Messungen mit der Wisconsin-Kassette bewegen sich weitgehend in dem Streuintervall, das mit dem Siemens-kV-Meßgerät ermittelt wurde, nur bei 100 kV ergibt sich eine größere Abweichung von - 2,5%. Die Doppelkammer ergibt - abgesehen von einer Abweichung bei 70 kV (+ 6,5%) - eine ebenso gute Übereinstimmung. Die Ardran-Crooks-Kassette liefert wiederum viel zu hohe Spannungen (+ 4,4% bis + 9,7%).

Die Reproduktionseigenschaften des Generators waren mit Schwankungen zwischen 0,7 und 1,7% hervorragend, sie wurden bei den hier gemachten Untersuchungen nur von dem Pandoros-Generator übertroffen. Besonders hervorzuheben ist, daß diese gute Spannungseinhaltung unabhängig war von der Strombelastung des Generators, die bei diesem Typ auf die Werte 100%, 80% und 10% der Maximalbelastung bei der jeweiligen mAs-Leistung eingestellt werden.

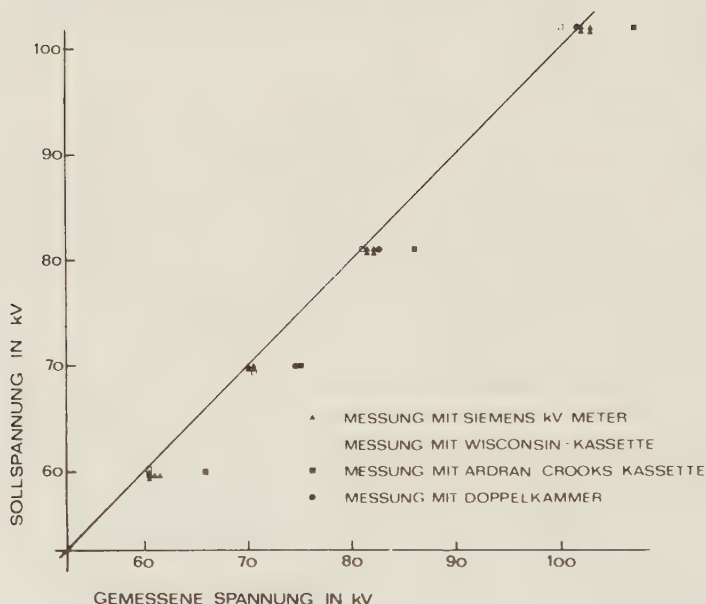


Abb. 20: Die Messungen am Polyphos Generator im Versuchslabor der Firma Siemens, Erlangen. Nur geringfügig schlechtere Reproduktionseigenschaften als der Pandoros-Generator. Bei sehr guter Übereinstimmung der Meßwerte von Siemens-Gerät und Wisconsin-Kassette mit den Sollwerten weicht die Doppelkammer bei 70 kV stärker nach oben ab, und die Ardran-Crooks-Kassette erbringt in allen Bereichen wesentlich höhere Meßwerte.

4.4 Gigantos-Generator im Arbeitsraum RÖ 16 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg

Die Messungen an diesem Gigantos-Generator mit drei angeschlossenen Röhren (B I - B III) brachten die größten Abweichungen. Die zuerst durchgeführten Messungen mit den Testkassetten zeigten sehr verwirrende Ergebnisse. Erst mit dem Siemens-kV-Meßgerät konnten Reproduktionsüberprüfungen größeren Ausmaßes durchgeführt werden. Dabei ergaben sich die oben aufgeführten Schwankungen, die bei dem Arbeitsplatz B III mit 23% den größten Betrag erreichten. Um einen genaueren Überblick über das Verhalten des Generators zu erhalten, wurden an mehreren Tagen Meßreihen durchgeführt, die in Tabelle 11 niedergelegt sind. Es wurden auch Meßserien mit einer festeingestellten Spannung und festem mAs-Wert durchgeführt. Dabei ergaben sich teilweise innerhalb dieser einen Serie sehr gute Wiederholungen, teilweise aber auch Sprünge von bis zu 7,2% bei 80 kV.

Tab. 11: Serienmessungen an den drei Röhren von RÖ 16 bei fest eingestellten Generatordaten von 80 kV/50 mAs

B I :	78,5	-	77,0	-	83,5	-	83,0	-	83,0
B II :	82,0	-	76,5	-	78,0	-	77,0	-	77,0
B III:	93,5	-	92,5	-	92,5	-	93,5	-	94,0

Wie dieses Beispiel an B I und B II zeigt, war auch häufig ein Einpendeln des Meßwertes nach anfänglichen Sprüngen zu beobachten. Wie schon bei den Messungen am Tridoros-Optimatic-Generator in der Röntgenabteilung der Medizinischen

Universitätsklinik Erlangen wurde deutlich, daß verschiedene Röhren an einem Generator sehr verschiedene Strahlenhärten haben können. Dies kann sehr große Fehler bei der Herstellung von Aufnahmen zur Folge haben. Die oben aufgeführten Meßreihen wurden zeitlich direkt hintereinander folgend ausgeführt, d.h. beim Umschalten von B II auf B III sprang die Spannung von 77,0 kV auf 93,5 kV (+ 21,4%).

Auffallend war auch das Verhalten des Generators, sein Spannungsverhalten plötzlich zu ändern (vg. B III in Tab. 10 am 18. 1.). Es wurden z.B. in einer Serie für eingestellte 80 kV 84,5 kV gemessen und für eingestellte 70 kV nur 1,5 kV weniger, obwohl die Messungen direkt hintereinander erfolgten. Das Siemens-kV-Meßgerät konnte durch sofortige Kontrollmessungen zeigen, daß tatsächlich plötzlich alle Meßwerte um ca. 8 kV höher lagen, bei den anderen Meßmethoden führt die Auswertung, die systembedingt zu einem späteren Zeitpunkt an anderer Stelle durchgeführt werden muß, zu beträchtlichen Verwirrungen; Kontrollmessungen können dann nicht mehr durchgeführt werden.

Wegen der großen Schwankungsbreiten dieses Generators wurde kein spezieller Vergleich der Meßmethoden durchgeführt, weil die Messungen mit den Kassetten und der Doppelkammer zufallsbedingt während der unterschiedlichsten Spannungszustände des Generators durchgeführt sein konnten. Die Überprüfung dieser Anlage zeigt aber deutlich, wie wichtig eine regelmäßige Kontrolle von Röntgendiagnostikgeräten ist. Befriedigende Aufnahmen sind hier nur sehr schwer möglich. Eine Erklärung solcher Schwankungen könnte eine sehr schlechte Regelung des Netzangleichs oder z.B. der Einfluß anderer elektrischer Anlagen, wie das Anfahren des Liftes sein, was ebenfalls schon beobachtet wurde (22).

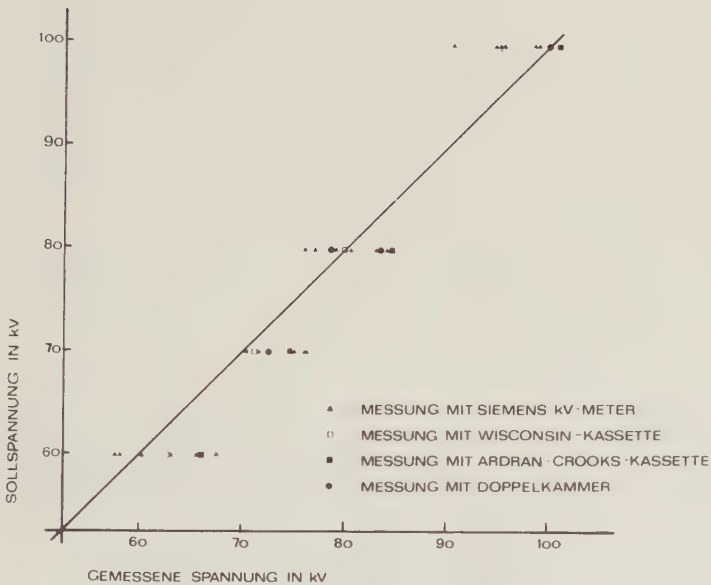


Abb. 21: Graphische Darstellung der Meßwerte am Gigantos-Generator am Arbeitsplatz I (B I) im Arbeitsraum RÖ 16 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg.
Schwankung des Meßwertes bei 60 kV 17%.

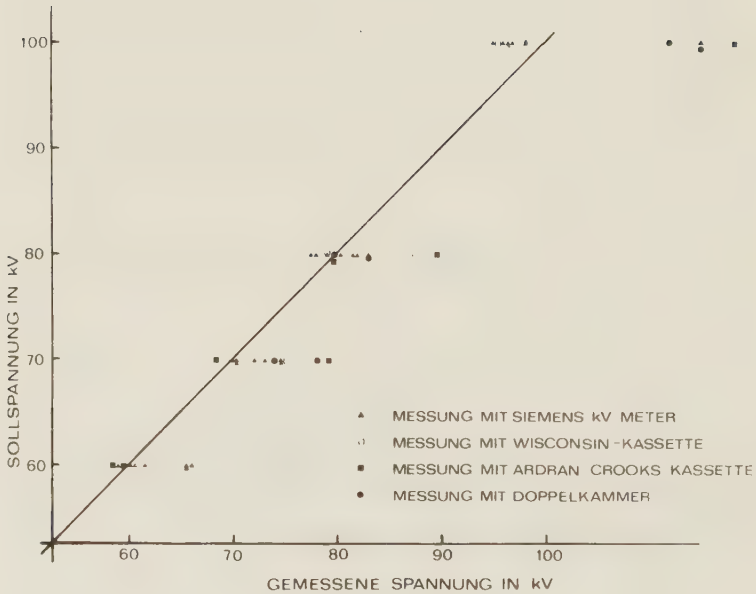


Abb. 22: Graphische Darstellung der Meßwerte am Gigantos-Generator am Arbeitsplatz II (B II) im Arbeitsraum RÖ 16 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg.
Schwankung des Meßwertes bei 100 kV 23,3%.

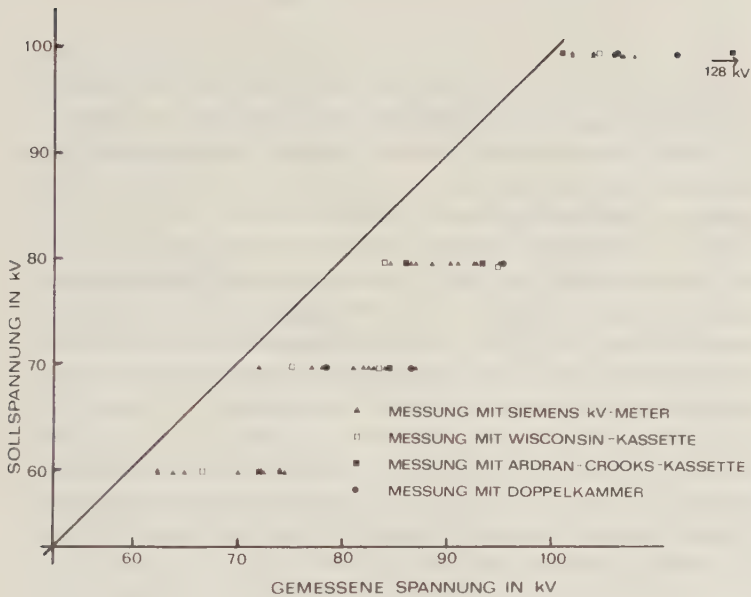


Abb. 23: Graphische Darstellung der Meßwerte am Gigantos-Generator am Arbeitsplatz III (B III) im Arbeitsraum RÖ 16 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg.
Schwankungen des Meßwertes bis 20,8%.

4.5 Gigantos-Generator im Arbeitsraum RÖ 3 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg

Die Messungen mit dem Siemens-kV-Meßgerät erbrachten bei normaler Strombelastung Schwankungen zwischen 2,5 und 8,3%, dies ist wesentlich besser als an der Anlage im Arbeitsraum RÖ 16, erreicht aber qualitativ nicht den Pandoros- und den Polyphos-Generator.

Die mit der Wisconsin-Kassette gemessenen Spannungen lagen alle in dem Intervall, das durch Wiederholungsmessungen mit dem kV-Meter ermittelt wurde. Mit der Doppelkammer erreicht man geringfügig höhere Werte, nur bei 80 kV war die Abweichung mit + 6,9% größer; die Ardran-Crooks-Kassette ergibt deutlich höhere (bis zu 11,5%) Spannungen.

Mit dem Siemens-kV-Meßgerät wurde darüber hinaus noch aufgezeigt, daß dieses Röntgengerät sehr stark auf große Strombelastung reagiert, wie es bei anderen Anlagen nicht beobachtet werden konnte.

Beispiel bei Einstellung auf 80 kV:

mit	9 mAs	:	77 kV
mit	50 mAs	:	71 kV
mit	200 mAs	:	68 kV

Dies entspricht einem Rückgang der Spannung um 11,7%. Bei einer Messung bei 100 kV wurden sogar 78,5 kV anstelle von 98 kV gemessen, dies ist ein Abfall von 19,9% (Belastung 50 mAs anstatt 10 mAs).

4.6 Messungen an Tridoros-Generatoren älterer Bauart

Die Messungen an den beiden Röntgenanlagen des Typs Tridoros (Radiologisches Zentrum im Klinikum Nürnberg, Arbeitsraum RÖ 11 und Institut für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg) brachten die besten Übereinstimmungen aller Meßmethoden.

Die Wisconsin-Kassette lag mit ihren Werten wieder etwas unterhalb der Meßwerte des kV-Meters (abgesehen von dem Ergebnis bei 60 kV am Erlanger Tridoros). Erstaunlich ist die gute Übereinstimmung mit der Doppelkammer und der Ardran-Crooks-Kassette, die an diesen Geräten - im Gegensatz zu den anderen Ergebnissen - sogar teilweise geringfügig kleinere Spannungen ermittelten als Wisconsin-Kassette und Siemens-kV-Meßgerät. Am Erlanger Tridoros war die Übereinstimmung noch etwas besser als im Arbeitsraum RÖ 11 in Nürnberg.

Man kann vermuten, daß die beiden Meßmethoden (Ardran-Crooks-Kassette und Doppelkammer) in ihrer Kalibrierung auf solche etwas älteren Sechspuls-Geräte abgestimmt sind (Baujahr. 1960/61).

Einen Nebenfund erbrachte die Überprüfung der Reproduktionseigenschaften des Erlanger Tridoros-Gerätes. Es wurde z.B. die Spannung von 60 kV jedesmal neu eingestellt, einmal von tieferen Spannungen herauf, ein anderes Mal von höheren Spannungen heruntergeregelt und dann die Röhre ausgelöst. Es ergab sich ein charakteristisches Verteilungsmuster:

62,0 kV - 58,0 kV - 62,0 kV - 58,5 kV usw.

Eine Erklärung ergibt sich aus der Tatsache, daß das Spannungseinstellrad des Tridoros 4 eine kontinuierliche Spannungseinstellung vorgibt, die real gar nicht existiert. Die Spannung wird von den Sekundärwindungen des Trans-

formators über einen Schleifkontakt abgegriffen, der von Windung zu Windung "hüpft". Dabei werden nur einzelne diskrete Schaltstufen erreicht, aber keine kontinuierliche Regelung. Deshalb ergaben sich beim Einregeln von höherer Spannung größere Werte und dementsprechend beim Einregeln von unten niedrigere (Hysteresiseffekt).

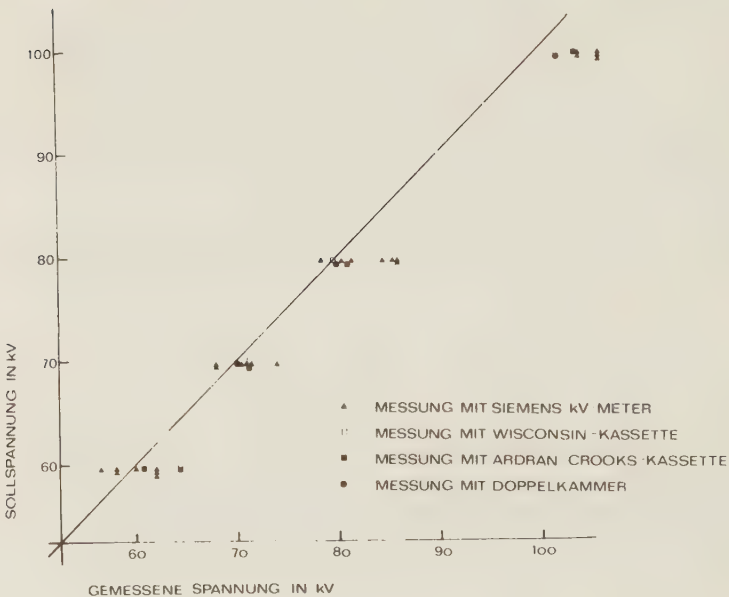


Abb. 24: Meßergebnisse am Tridoros 4-Generator. Streuung der Meßergebnisse bis zu 9% infolge Hysteresis. Die Meßergebnisse der Kassetten und der Doppelkammer liegen weitestgehend im Bereich, der durch die Messungen mit dem Siemens-Gerät ermittelt wurde.

4.7 Messungen an Dentalröntgengeräten in der Zahn-, Mund- und Kieferklinik der Universität Erlangen

Die Messung der Spannung an den Dentalröntgengeräten bereitet - wie schon der methodische Teil dieser Arbeit gezeigt hat - oft größere Schwierigkeiten. Mit der Doppelkammer können wegen der fehlenden Kalibrierspannung von 90 kV überhaupt keine Messungen durchgeführt werden. Die Kassetten können benutzt werden, aber wegen der schwachen Dosisleistung der Zahnfilmgeräte (maximal zwischen 5 und 7 mAs je nach Typ) müssen sehr viele Aufnahmen auf einen Film belichtet werden. Die Wisconsin-Kassette benötigt wegen ihrer sehr geringen Empfindlichkeit noch ca. doppelt so viele Aufnahmen wie die Ardran-Crooks-Kassette; die maximale Anzahl betrug beim 56 kV-Gerät 60 Aufnahmen pro Film. Da diese Röntgengeräte vom Arbeitsprinzip her nicht auf solche Belastungen eingerichtet sind (die Anzahl von Röntgenaufnahmen in einer Zahnarztpraxis ist nicht so hoch wie z.B. in der Röntgenabteilung eines Krankenhauses), muß sehr stark auf eventuelle Erhitzungen der Röhre geachtet werden, was die Messung zusätzlich verlängert. Mit dem Siemens-kV-Meßgerät kann nur die 70 kV-Zahnkugel gemessen werden, die Dosisleistung des 56 kV-Gerätes reicht nicht aus. Am 70 kV-Gerät konnte die Schwankungsbreite der Spannung mit 4,4% ermittelt werden, das Meßintervall des Siemens-Meßgerätes liegt im Bereich der Nennspannung, die Wisconsin- und die Ardran-Crooks-Kassette zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Beim 56 kV-Gerät liegen nur die Meßergebnisse der beiden Kassetten vor. Die Wisconsin-Kassette zeigt 4,5% mehr, die Ardran-Crooks-Kassette 9,5% weniger an als die Nennspannung. Es fällt auf, daß die Meßergebnisse mit der Ardran-Crooks-Kassette an beiden Dentalröntgengeräten unter den Ergebnissen mit der Wisconsin-Kassette liegen, während bei allen anderen Röntgengeräten, insbesondere bei den Zwölf-

pulsgeneratoren und dem Gleichspannungsgerät, die Ardran-Crooks-Ergebnisse durch stark überhöhte Werte auffielen. Dies ist durch eine fehlende Anpassung an den Typ des jeweiligen Generators zu erklären. Bei den hier untersuchten Dentalröntgengeräten handelt es sich um Zweipulsgeneratoren, die dadurch gekennzeichnet sind, daß die Effektivspannung, die ja von der Ardran-Crooks-Kassette gemessen wird, wesentlich tiefer liegt als die Spitzenspannung (93,5 kV effektiv bei einer Spitzenspannung von 100 kV). Weil die Ardran-Crooks-Kassette dies nicht berücksichtigt, fallen die Meßergebnisse im Vergleich zu denen an anderen Generatoren sehr niedrig aus. Die Wisconsin-Kassette gleicht dies durch eine zweite Kalibrierkurve - zumindest bedingt - aus (vgl. 2.3.2.2).

4.8 Messungen am Stabilipan-Generator im Institut für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg

Der Stabilipan-Generator fällt etwas aus dem Rahmen der untersuchten Geräte. Es handelt sich um ein Therapiegerät, das im Spannungsbereich zwischen 50 und 300 kV eingesetzt werden kann; am meisten benutzt wird der Arbeitsbereich zwischen 100 kV und 200 kV, im niedrigen Spannungsbereich ist die Einstellung der Spannung nur schwer zu kontrollieren, da das eingebaute Meßgerät hier nicht präzise genug anzeigt. Außerdem ist das Einstellrad für die Spannung unter 100 kV auch nicht exakt zu bedienen. Die Meßergebnisse liegen trotzdem sehr eng beieinander. Wegen der geringen Leistung des Therapiegerätes (max. 10 mA) konnte das Siemens-Meßgerät nicht verwendet werden.

Tab. 12: Vergleich der Spannungsschwankungen an einzelnen Generatortypen

Generator	Schwankungen am gleichen Generator (gemessen mit dem Siemens-kV-Meter)	Abweichung der Spannung für ver- schiedene Röhren am gleichen Generator
Gleichspannungs- generator	0 - 1,5 %	-----
Mittelfrequenz- generator	0,7 - 1,7 %	-----
Zwölfpuls-generator	an einzelnen Geräten bis 8% (in einem Fall bis 23%)	bis 20% (ohne Änderung der Spannungseinstellung, verschie- dene Kabellänge!)
Sechspuls-generator	an einzelnen Geräten bis 9% (Hysteresis)	bis 15% (ohne Änderung der Spannungseinstellung, verschie- dene Kabellänge!)
Zweipuls-generator (70 kV fest)	5 %	-----

5. Wertung

Es wurden vier Methoden der indirekten Spannungsmessung an Röntgengeräten untersucht. Nach Betrachtung aller Vor- und Nachteile schneidet das Siemens-kV-Meßgerät am besten ab. Der überragende Bedienungskomfort, verbunden mit einer hohen Meßgenauigkeit, spricht für dieses System. Der Bedienungskomfort des Gerätes erlaubt in kurzer Zeit eine Vielfalt von Messungen, was sicherlich dazu helfen wird, die Frequenz der Routineuntersuchungen an Röntgengeräten zu erhöhen. Es ist eine umfassende Diagnose der Anlagen in Bezug auf Spannungseinhaltung und Konstanz möglich, was mit den anderen Methoden aus Zeitgründen oft scheitern wird. Der Aufwand, der hier getrieben werden muß, um die Spannung zu messen, ist vergleichsweise sehr hoch. Die Wisconsin-Kassette erlaubt hier - insbesondere wegen ihrer Bedienungsverbesserungen gegenüber der Ardran-Crooks-Kassette - noch das schnellste Arbeiten. Der Doppelkammer wird wegen des sehr hohen Arbeitsaufwandes, der Unhandlichkeit und der problematischen zeichnerischen Auswertung in Zukunft keine Bedeutung mehr für die Spannungsmessung zukommen. Zudem ist die Meßgenauigkeit wegen nicht unbestrittener Voraussetzungen von vornherein in Frage gestellt.

Eine schnelle und bequeme Arbeitsweise der Meßgeräte ist wünschenswert, damit häufiger und intensiver eine Überprüfung der Geräte stattfinden kann. Es zeigte sich nämlich, daß die geprüften Röntgenanlagen mit ihrer Spannung oftmals erheblich vom Sollwert abweichen, eine Tatsache, die auch durch andere Untersuchungen bestätigt wird (21, 22). Die hier gemachten Messungen brachten kein so erfreuliches Bild wie z.B. die Untersuchung der Hospital Physicists Association (23).

Die oben niedergelegten Messungen im Arbeitsraum RÖ 16 des Radiologischen Zentrums im Klinikum Nürnberg waren

z.B. gekennzeichnet durch ein vollkommen unbestimmbares Verhalten des Generators. Nur mit Hilfe des Siemens-kV-Meßgerätes konnten durch eine Vielzahl von Messungen an verschiedenen Tagen dieses Verhalten dargestellt werden. Durch Meßserien, die mit allen anderen drei Methoden unmöglich gewesen wären, konnten plötzlich Sprünge im Spannungsverhalten aufgezeigt werden. Bei den anderen Meßmethoden tauchten hier oft verwirrende Diskrepanzen auf, weil das Meßergebnis ja nicht sofort zur Stelle ist und erst später ermittelt werden kann, wenn Kontrollmessungen nicht mehr möglich sind.

Betrachtet man die Genauigkeit der untersuchten Meßmethoden, dann schneidet das Siemens-kV-Meßgerät ebenfalls am besten ab. In der Bedienungsanleitung ist genau dargelegt, wie Fehler entstehen können und wie sie vermieden werden (Lage des Detektors, Vorfilterung der Röntgenröhre, Wahl der Kupferfilter). Da auch die Wahl des Generatortyps mit gewissen Einschränkungen (ungebräuchliche Spannungsformen) möglich ist, entspricht das Meßergebnis weitgehend der tatsächlichen Spitzenspannung des Generators. Die anderen Meßmethoden lassen die Wahl des Generators (bedingt nur bei der Wisconsin-Kassette) sowie exakte Darstellung der Fehlermöglichkeiten vermissen.

Das Siemens-Meßgerät ist unempfindlich gegenüber Bedienungsfehlern. Die Auswertung ist unkompliziert, weil das Meßergebnis unmittelbar nach der Benutzung der Röhre angezeigt wird. Bei den anderen Methoden können Fehler entstehen, weil das Meßergebnis (Spannung) erst nach durchlaufen mehrerer Zwischenschritte, die jeweils Fehlerquelle sein können, erhalten wird. Bei den Kassetten wären diese Schritte: Belichtung, falsches Ablesen am Densitometer, Rechen- und Rundungsfehler beim Interpolieren; bei der Doppelkammer das zweimalige graphische Auswerten und Fehler bei der Errechnung der jeweiligen Quotienten Q .

Stellt man ganz hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Spannungsmessung, ist auch das Siemens-kV-Meßgerät nicht fehlerfrei. Da mit ihm zeitlich integrierend gemessen wird, kann der genaue Spannungsverlauf mit seinen "Spikes" während der Zeit der Röntgenaufnahme nicht ermittelt werden. Das Siemens-Gerät ermittelt vielmehr eine "mittlere Spitzenspannung". Dies ist von Nachteil, wenn z.B. das Anschwingverhalten des Röntgenerators überprüft werden soll, oder wenn der Generator sich nicht in das Schema Zweipuls, Sechspuls, Zwölfpuls, Gleichstrom einfügt. Der Generator kann z.B. eine sägezahnartige Charakteristik besitzen, bei der die Effektivspannung niedriger liegt als bei einer sinusförmigen Spannung mit gleicher Spitzenspannung.

Es gibt inzwischen Spannungsmeßgeräte, die die tatsächliche Spannung in jedem Zeitpunkt der Röntgenaufnahme darstellen können (Digi X), ohne an das elektrische System des Röntgenerates angeschlossen werden zu müssen, die also ebenfalls indirekt messen. Diese Geräte kosten allerdings ein Vielfaches des Siemens-kV-Meßgerätes, dessen Intention (28) es gerade war, eine auch preisliche Alternative zu den bisher üblichen Kassetten darzustellen. Dieser Aufgabe wird es gerecht.

Eine noch höhere Meßgenauigkeit ist für die praktische Wartung der Röntgenanlagen auch kaum von Bedeutung, da der Meßfehler des Siemens-Gerätes weit unter dem Wert von 5% liegt, an dem sich die Genauigkeit der Röntgenanlagen orientieren soll (24). Zudem hat sich gezeigt, daß die Meßgenauigkeit des Systems bereits höher liegt als die Schwankungsbreiten der meisten hier untersuchten Generatoren, die durchaus dem Stand der Technik entsprechen (z.B. Siemens Gigantos).

In Tabelle 13 wird noch einmal ein kurzer Vergleich der hier untersuchten Geräte und eines Gerätes, das die tatsächliche Spitzenspannung mißt, durchgeführt.

Tab. 13: Kurzer Vergleich von Ardran-Crooks-Kassette, Wisconsin-Kassette, Doppelkammer, Siemens-kV-Meter und Digi X

	Ardran-Crooks-Kassette	Wisconsin-Kassette	Doppelkammermethode nach Pychlau
gemessene Spannung	effektive Spannung	effektive Spannung	effektive Spannung
Meßbereich	40 - 155 kV	47 - 129 kV	70 - 200 kV
Genaugigkeit bei 100 kV	$\pm 0,5\%$ (Ablesefehler) $\pm 1,25\%$ (Interpolation) $\pm 2,5\%$ (Abhängigkeit von der Vorfilterung) ca. 0 - 4,5% (Abhängigkeit von der Spannung und vom Generatortyp)	$\pm 0,1\%$ (Ablesefehler) $\pm 0,25\%$ (Interpolation) $\pm 2,5\%$ (Abhängigkeit von der Vorfilterung) ca. 0 - 2,5% (Abhängigkeit von der Spannung und vom Generatortyp geringer als bei der Ardran-Crooks-Kassette)	$\pm 4\%$ (Eigenfilterbestimmung) $\pm 2,5\%$ (Zählersprünge) 12,5% (über 130 kV - $\pm 2\%$ Röhrenfilter
Handhabung	(-) Anbringung von Zusatzfiltern an den Röhren (-) Ermittlung der geeigneten Schwärzung	(+) mehrere Spannungsmessungen auf demselben Film (-) Densitometer notwendig	(+) Dosisleistung unabhängig (-) Bestimmung des Eigenfilters (theor. Grundl. fragl.)

Fortsetzung Tab. 13:

	Ardran-Crooks-Kassette	Wisconsin-Kassette	Doppelkammermethode nach Pychlau
Handhabung	(-) Densitometer notwendig	(-) Filmentwicklung (allerdings notwendiger als bei Ardran-Crooks-Kassette)	(-) Anbringung, Transport
Anschaffungskosten	(-) Filmentwicklung (zeitaufwendig)	etwas höher als bei der Ardran-Crooks-Kassette	(-) Eigenfilterbestimmung (zeitaufwendig)
laufende Kosten	gering Filme	weniger als bei der Ardran-Crooks-Kassette	höher als bei den Kassetten keine

	Siemens-kV-Meßgerät	Digi-X
gemessene Spannung	Spitzenspannung (indirekt)	Scheitelspannung/Spitzenspannung (direkt)
Meßbereich	50 - 150 kV	40 - 180 kV, Mammographie: 25 - 40 kV
Genauigkeit bei 100 kV	$\pm 0,25\%$ (Anzeigegenauigkeit) $\pm 2,5\%$ (Abhängigkeit von der Vorfilterung) ca. $\pm 2,5\%$ mittlerer quadratischer Fehler	$\pm 0,5\%$ (Auflösung) ca. $\pm 1\%$ (Anzeigegenauigkeit bei Gleichspannungsmessung)
Handhabung	(+) hohe Meßgeschwindigkeit (+) problemlose Anbringung (+) Berücksichtigung der Spannungsform	(+) hohe Meßgeschwindigkeit (+) problemlose Handhabung (++) Spannungsform braucht nicht berücksichtigt zu werden, da direkte Spitzenspannungsmessung (+) Messung der Aufnahmezeit: 0,2 ms - 99,9 sec (+) digitale Speicherung der Spannungsform möglich ca. DM 15 000,--
Anschaffungskosten	ca. DM 6 000,--	
laufende Kosten	keine	keine

6. Zusammenfassung

Ein wichtiger Punkt bei der Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik ist die exakte Einhaltung der Spannung, die durch direkte und indirekte, nicht mit dem Röntgengerät elektrisch gekoppelten Meßmethoden, kontrolliert werden kann.

Es wurden vier indirekte Meßmethoden untersucht:

2 Meßkassetten - nach Ardran-Crooks und Wisconsin - eine Ionisationskammer nach Pychlau und ein vollautomatisches kV-Meter der Firma Siemens.

Neben der Meßgenauigkeit wurde besonderes Augenmerk darauf gerichtet, wie bedienungsfreundlich und handhabungssicher die Geräte sind. Das Siemens-Gerät erzielte innerhalb der weitaus kürzesten Zeit die auch relativ genauesten Ergebnisse. Die anderen Geräte erfordern eine langwierige Ausarbeitung bis das Ergebnis bekannt ist; die Genauigkeit des kV-Meters erreichte nur die Wisconsin-Kassette, die beiden anderen Methoden weichen teilweise erheblich von den Sollwerten ab.

Bei Untersuchungen an verschiedenen Röntgengeräten des Klinikums Nürnberg und der Kliniken im Universitätskrankenhaus Erlangen zeigte sich, daß einzelne Generatoren sehr starke Schwankungen ihrer Spannung aufwiesen und daß verschiedene Röntgenröhren an denselben Generatoren unterschiedliche Strahlenqualitäten bei gleicher Sollspannung zeigten.

Literatur

- (1) Goldmann, L.W., S.Beech:
Analysis of retakes: Understanding, managing and using an analysis of retakes.
Program for quality assurance. Washington, DC,
United States Food and Drug Administration, 1979
- (2) Hall, C.L.:
Economic analysis of quality control program.
Application of optical instrumentation in medicine.
VI Proceedings of the Society of Photooptical
Instrumentation Engineers 127: 271 (1977)
- (3) Trout, E.D. et al.:
Analysis of the rejection rate of chest radiographs
obtained during the coal mine black lung program.
Radiology 109: 25 (1973)
- (4) Brown, M.R.:
Preventive maintenance reduces X-ray equipment costs.
Dimensions in the health service 51: 3 (1974)
- (5) Lissner, J.:
Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik.
Fortschritte und Fortbildung in der Medizin 381:
167 (1981)
- (6) Holloway, A.F., E.M.Campbell, M.S.Essenbarg:
Exposure characteristics of diagnostic X-ray
machines.
British Journal of Radiology 45: 48-52 (1972)

- (7) Showalter, C.K. et al.:
An analysis of film/screen-combinations and patient exposures from nationwide evaluation of X-ray trends (NEXT).
Application of optical instrumentation in medicine. VI Proceedings of the Society of Photooptical Instrumentation Engineers 127: 126 (1977)
- (8) Schöfer, H.A. et al.:
Unnecessary exposure due to incorrect use of radiological equipment.
Radiation Protection in Proceedings, Patient Exposure to Radiation in Medical X-Ray Diagnosis, Commission of the European Community, Munich-Neuherberg 1981
- (9) Roloff, W., A.Eberhardt:
Erfahrungen bei der Überprüfung von Röntgenanlagen. Technische Überwachung 18: 319-324 (1977)
- (10) Stender, H.S.:
Zur praktischen Qualitätssicherung in der Röntgen-diagnostik.
Röntgenblätter 33: 618-625 (1980)
- (11) Stadler, H.W., H.Fuchs, Th.Schmidt:
Patientenbelastung und Filmschwärzung bei Röntgen-diagnostikgeräten mit Belichtungsautomatik.
Tagungsband der Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., Bern 1973
- (12) Shigetoshi, A. et al.:
Radiation quality and anode effect in diagnostic roentgenography in Hiroshima and Nagasaki.
Health Physics 24: 611-617 (1973)

- (13) Felix, R., B. Ramm:
Das Röntgenbild; Theorie, Methodik, Technik,
Leitfaden für Ausbildung und Anwendung.
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1980
- (14) Panzer, W.:
Probleme bei der quantitativen Beschreibung von
Röntgenbildern.
12. Wissenschaftliche Tagung der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik e.V., Hüthig Verlag,
Heidelberg, 1982
- (15) Ardran, G.M., H.E. Crooks:
Checking diagnostic X-ray beam quality.
British Journal of Radiology 41: 193-198 (1968)
- (16) Ardran, G.M., H.E. Crooks:
The measurement of inherent filtration in diagnostic
X-ray tubes and the effect of target angle on X-ray
quality.
British Journal of Radiology 45: 599-602 (1972)
- (17) Physikalisch-technische Werkstätten Dr. Pychlau,
Freiburg:
Ermittlung der Röhrenspannung nach Ardran und Crooks.
- (18) Wardenburg v., J.:
Die Messung der absorbierten Energie mit Fricke-
Lösung bei Röntgenaufnahmen des Unterarms.
Dissertation, Medizinische Fakultät der Universität
Erlangen-Nürnberg, 1981
- (19) Pychlau, P.:
Spannungsmessung an Röntgenröhren, insbesondere
während Röntgenblitzen.
Radiobiologica Radiotherapeutica 7: 123-130 (1966)

- (20) Schaal,A.:
Die Ermittlung der Röhrenspannung und des Eigen-
filters in Röntgendiagnostik-Abteilungen.
Fortschr. Röntgenstr. 121: 244-247 (1974)
- (21) Jackson,W.:
Measurement of Kilovoltage by thepenetrameter-
theoretical aspects.
Phys.med.biol. 20: 268-281 (1975)
- (22) The Hospital Physicists' Association:
Measurement and standardization of the kilovoltage
across diagnostic X-ray tubes.
Report D/ The Physics of Radiodiagnosis, London 1975
- (23) The Hospital Physicists' Association:
Quality Assurance Measurements in Diagnostic
Radiology.
Conference Report, Series Nr. 29, London 1979
- (24) Aichinger,H.:
Siemens-kV-Meter, the physical background and its
technical realisation.
Hausinterne Informationsschrift der Siemens AG,
Erlangen 1981
- (25) Jacobson,A.F., J.R.Cameron, M.P.Siedband, and J.W.
Wagner:
Test Cassettes for Measuring Peak Tube Potential
of Diagnostc X-Ray Machines.
Medical Physics 3: 19-25 (1976)
- (26) Bedienungsanleitung der Wisconsin-Test-Kassette
mit Eichkurven.
Radiation Measurements, Inc., Middleton, WI 53562

- (27) Giarratano, J.C. et al.:
Comparison of voltage-divider, modified Ardran-Crooks cassette and Ge (Li) spectrometer methods to determine the peak kilovoltage (kVp) of diagnostic X-ray units.
Medical Physics 3: (1976)
- (28) Mitteilungen der Siemens AG, Erlangen
- (29) Persönliche Mitteilungen Dr. Rehm, Radiologisches Zentrum im Klinikum Nürnberg

Herrn Prof. Dr. Dr. H. Pauly möchte ich an dieser Stelle für die Überlassung des Themas und die großzügige Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit sehr herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Priv.-Doz. Dr. Th. Schmidt, unter dessen ausgezeichneten Betreuung diese Arbeit entstand. Er hat durch seine stete Hilfsbereitschaft wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Zeitler, der mir die Arbeit an verschiedenen röntgendiagnostischen Anlagen des Klinikums Nürnberg ermöglichte.

Sehr herzlich danken möchte ich ebenfalls allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Institut für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg und der Radiologischen Abteilung des Klinikums Nürnberg, die mir mit Ihrer Hilfe zur Seite standen.

Lebenslauf

Am 01. 12. 1983 wurde ich als Sohn der Steuerinspektoren Hannelore und Richard Zumpe in Nürnberg geboren.

1965 Eintritt in die Grundschule an der Sperberstraße.
Nach 4 Jahren - im September 1969 - Übertritt an das Pirckheimer-Gymnasium in Nürnberg, an dem ich 1978 die Reifeprüfung ablegte.

Im November 1978 begann ich das Studium der Zahnheilkunde an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Die zahnärztliche Vorprüfung legte ich im April 1981 ab, am 15. 12. 1983 beendete ich mit der letzten Prüfung des Staatsexamens mein Studium.

Am 13. 1. 1984 wurde mir vom Bayerischen Staatsministerium des Innern die Approbation als Zahnarzt ausgestellt.

